

Big Bang et au- delà

Barrau

VISIT...

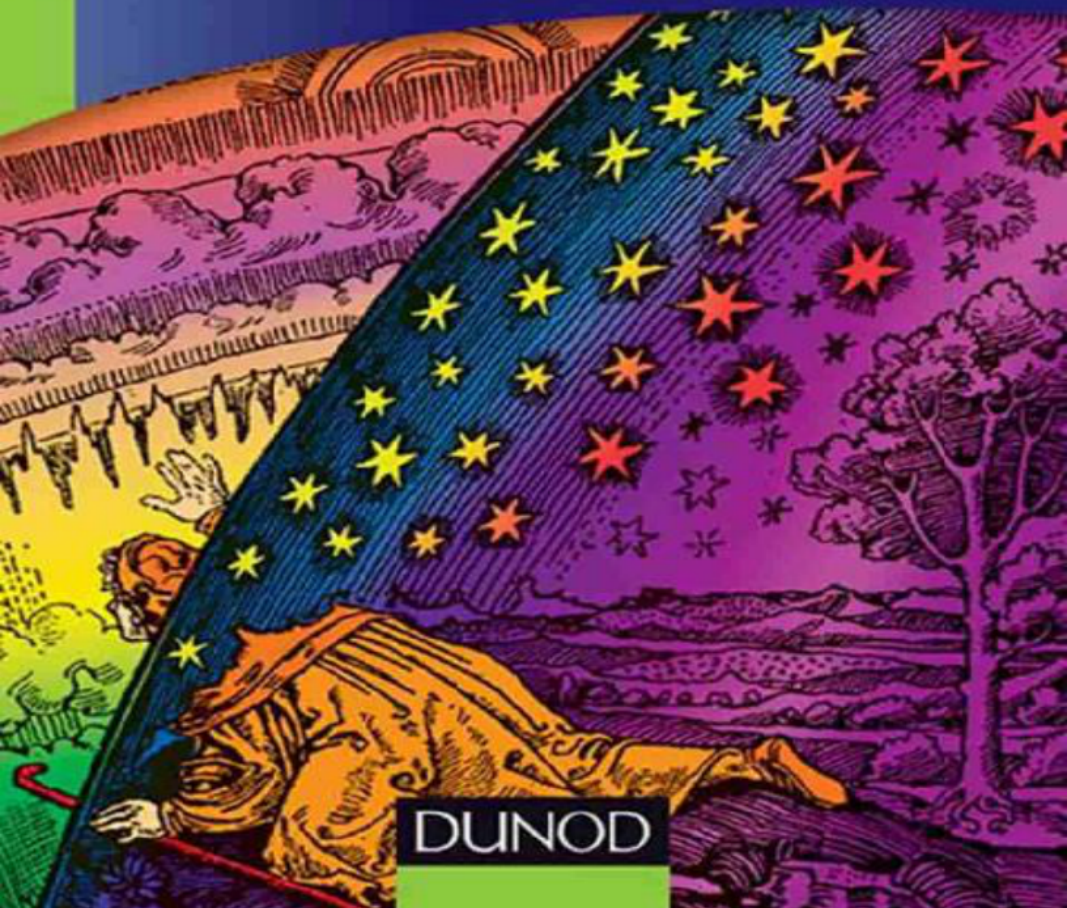
LANZAROTE
Caliente.COM

QUAI DES SCIENCES

AURÉLIEN **BARRAU**

BIG BANG ET AU-DELÀ

BALADE EN COSMOLOGIE



DUNOD

Copyright Publilog, 2013
9782100593361

Conception de la couverture : Raphaël Tardif
Illustration : d'après *L'atmosphère : météorologie populaire*
de Camille Flammarion (1888)

Visitez notre site Web : www.dunod.com

Consultez le [site Web de cet ouvrage](#)

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, sous réserve du nom de l'auteur et de la source, que « les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information », toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite (art. L122-4). Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, notamment par téléchargement ou sortie imprimante, constituera donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Avant-Propos

« Le style peut donc aussi, de son éperon, protéger contre la menace terrifiante, aveuglante et mortelle, qui se présente, se donne à voir avec entêtement : la présence, donc, le contenu, la chose même, le sens, la vérité – à moins que ce ne soit déjà l'abyme défloré de tout ce dévoilement de la différence. »

Jacques Derrida, Éperons, les styles de Nietzsche.

Ce petit livre n'est pas un traité de cosmologie. Il n'est heureusement pas non plus une autobiographie ! Il est une simple balade en cosmologie, légère et sans visée systématique, destinée à tout esprit curieux, sans aucun prérequis scientifique. J'y mêle l'exposé de résultats bien connus et très fiables avec la présentation des avancées récentes et spéculations en cours. Parce que la science est avant tout une aventure humaine, j'ai esquissé, ici et là, en contrepoint des explications physiques fournies dans la langue la plus simple et accessible possible, mon expérience propre et mes ressentis. J'ai parfois même fait part de quelques convictions et révoltes personnelles. J'ai abordé, en filigrane, mon propre cheminement. Non que cela soit important ou exemplaire, naturellement, mais parce que j'aimerais contribuer à souligner la fragilité, tout autant que la fiabilité, de nos constructions scientifiques. La science n'est pas indépendante des femmes et hommes qui la pratiquent. La science n'est pas une froide découverte du réel « en lui-même ». Elle est, avant tout, une « manière de faire un monde ». Une manière élégante et cohérente mais évidemment non unique et non hégémonique.

Peut-on comprendre l'Univers ?

*« Puisque, sous un regard mélancolique, même les pierres semblent rêver,
on chercherait en vain ailleurs la noblesse dans l'Univers. »
Émile Cioran, Le Crépuscule des pensées.*

Le récit

L'Univers a 13,75 milliards d'années.

Au commencement, il n'y avait ni temps ni espace, ni aucune des particules aujourd'hui identifiées. N'existait qu'une sorte de mousse constituée de cordes ou de boucles. Cette mousse enfle et se complexifie. L'espace, le temps, la gravitation émergent. Une force unifiée régit alors l'Univers dont la taille commence à croître démesurément. Cette brève, mais immensément intense, phase d'inflation cesse brutalement. S'y dessinent les fluctuations microscopiques à l'origine des galaxies et des étoiles... Apparaissent les forces et corpuscules connus. La température chute. L'Univers poursuit son expansion mais le rythme s'est calmé. Matière et antimatière se sont en grande partie annihilées, seul un infime reliquat demeure, auquel nous devons pourtant tout de ce qui nous compose aujourd'hui. Les premiers noyaux se forment. L'Univers est encore si chaud qu'il est opaque à sa propre lumière, immédiatement absorbée dès qu'elle commence à se propager. Le monde n'est qu'un étrange bain sombre de constituants élémentaires en interaction. Enfin, la température devient assez faible pour que les électrons puissent se joindre aux noyaux et former des atomes ! Le cosmos devient transparent.

La gravitation reprend peu à peu ses droits. Des nuages de gaz s'effondrent. Apparaissent les étoiles qui se structurent en galaxies. Les plus massives de ces étoiles vivent très peu de temps, explosent et forment des trous noirs, des « astres occlus ». Les éléments lourds, essentiels pour l'apparition de la vie, commencent à être synthétisés. Autour des étoiles, se forment des planètes au sein desquelles peut prendre naissance une chimie subtile. La température moyenne de l'Univers n'est plus que de quelques degrés au-dessus du zéro absolu (-273°C). Étonnamment, l'expansion de l'Univers accélère à nouveau ! La distance entre les corps célestes augmente exponentiellement et une évolution imprévue semble se dessiner.

Voilà où nous en sommes.

Cette histoire est notre histoire. Elle est ce qu'on croit être le moins mauvais récit de nos origines. Elle est le cadre dans lequel se déploie ou se déplie notre physique. Elle constitue un mélange, parfois savant, souvent baroque, de quasi-certitudes et de spéculations effrénées. Elle ne s'achève pas ici. Elle se prolonge dans de multiples directions. Les interrogations et incompréhensions sont plus nombreuses que les réponses et les évidences. Les questions qui m'attirent aujourd'hui tout particulièrement sont celles de l'« avant Big Bang » et des univers multiples qui deviennent enfin significantes et entrent de plain-pied dans le champ des sciences dures. Elles conduisent à une nouvelle représentation du monde. Une représentation extrêmement incertaine, extrêmement hypothétique mais aussi extraordinairement fascinante ! Peut-être même révolutionnaire. Il faut recourir à de nouvelles théories, non encore soutenues par des résultats expérimentaux, ou pousser les théories connues à leurs limites. C'est un jeu dangereux. Mais l'exploration de nouveaux mondes n'est jamais tout à fait exempte de dangers...

Étonnement

Chaque détail de l'Univers est un abîme de complexité. Souvent une source intarissable d'émerveillement. Le frottement d'un plectre sur une corde de clavecin durant l'interprétation d'une suite de Bach, la saccade des ailes d'une mouche dans le soleil du petit matin demeurent absolument sidérants. Tant, au moins, que nous n'avons pas tout perdu de l'ingénuité de notre regard d'enfant. L'Univers est immensément étrange.

J'aime profondément la démarche de la physique. Tout à la fois humble et démiurgique. Il est question d'aborder – de comprendre, dit-on, mais aussi de réinventer, je crois – ce « grand autre », cette altérité radicale, ce qu'on nomme « le monde ». Il n'est finalement question que de cela. Il n'a toujours été question que de cela.

Mais il ne va pas de soi que le monde puisse être pensé. Il ne va pas de soi qu'une physique, une science de la nature donc, soit possible. Il ne va pas de soi qu'elle nous apprenne quelque chose du monde qui dépasse ce que notre esprit y a lui-même instillé. Qu'est-ce exactement qu'une science ? Qu'est-ce que la nature ? Et cette science, à supposer qu'elle soit possible, nous parlerait-elle d'ailleurs réellement du monde en tant que tel ou plutôt de nous-mêmes et du fonctionnement de notre cerveau ? Aborder ces questions abruptement est certainement absurde. Tenter d'y apporter une réponse claire, systématique et doctrinale est illusoire. Mais il faut, je crois, à chaque instant les

garder présentes à l'esprit. Cheminer en cosmologie en ne négligeant jamais l'étonnement primitif de ce semblant d'intelligibilité. Il est impossible – il m'est, en tout cas, impossible – de ne pas faire face à l'interrogation de Heidegger¹ revisitant Leibniz² : « Pourquoi y a-t-il l'Étant et non pas plutôt rien ? ». Ce qui n'est d'ailleurs pas sans faire écho à l'inquiétude de Wittgenstein³, représentant pourtant une tradition philosophique réputée divergente : « ce qui est mystique, ce n'est pas comment est le monde, mais le fait qu'il est ». Une immense étrangeté vertèbre l'existence même de l'Univers et le fait qu'il nous soit, au moins un peu, accessible.

Les étonnements qui jalonnent mon cheminement ne sont pas ceux de mes collègues qui ne sont pas ceux de mes étudiants. Et moins encore ceux d'un artiste ou d'un poète découvrant la cosmologie physique. Peu importe. Comme tous les grands champs de pensée, la philosophie est proprement indéfinissable. Mais si, suivant Platon⁴, nous la considérons comme une certaine manière de ne jamais tout à fait cesser d'être étonné, je crois qu'il serait insensé de pratiquer la physique – ou toute autre activité cognitive – sans entretenir un rapport étroit, ou peut-être même intime, avec la philosophie.

J'ai longtemps hésité dans mon choix d'études entre physique et philosophie. La décision fut difficile : Lettres-sup ou Math-sup ? Aujourd'hui, j'aimerais qu'il soit possible de ne pas avoir à choisir. Je crois même qu'il devrait être indispensable de ne pas choisir. Composer ses lignes de fuite, pour emprunter le beau concept de Gilles Deleuze⁵, comme autant de voix de fugue enchevêtrées les unes avec les autres.

Difficultés

Au-delà de cette curieuse capacité de la physique à appréhender le réel – à l'affronter ou à le créer peut-être –, il est remarquable que l'Univers lui-même soit un objet d'étude scientifique. L'Univers n'est pas un système comme les autres. Les processus locaux pourraient tout à fait être aisément compréhensibles sans que le cosmos lui-même entre dans le champ des sciences dures. Que le mouvement de la Lune autour de la Terre puisse être compris dans les mêmes termes que la chute d'un fruit dans un verger était l'immense découverte de Newton. Mais rien n'assurait *a priori* que cette démarche puisse être poussée jusqu'à décrire l'Univers lui-même. Au contraire, un certain nombre de spécificités de la cosmologie pouvaient laisser craindre qu'il soit impossible d'appréhender le « tout » en tant que système physique. La question ici posée n'est pas celle de ce qui se trouve *dans* l'Univers mais celle de la nature et de l'évolution de l'Univers *en lui-même*. Peut-on comprendre scientifiquement l'Univers en tant que tel ? Cette

question a-t-elle seulement un sens ? Les particularités de cette interrogation sont nombreuses.

D'abord, nous faisons partie du système décrit. Nous sommes un élément de l'Univers, une parcelle du système considéré. Nous avons même, en principe, une capacité d'influer sur son devenir. Étant donné notre comportement plus que désinvolte et irresponsable envers notre planète, il est plutôt rassurant que cette capacité soit, en pratique, insignifiante à l'échelle du cosmos ! Il n'en demeure pas moins que cela est tout à fait orthogonal à la démarche scientifique habituelle qui tente de mettre l'observateur à distance de l'objet étudié. Il est en général essentiel que celui qui observe n'interfère pas avec ce qui est observé. C'est une précaution élémentaire qu'il est inenvisageable de mettre en œuvre quand on s'intéresse à l'Univers.

Ensuite, l'expérience est non reproductible. La « naissance » de l'Univers n'a eu lieu qu'une fois ! Il est impossible de refaire l'expérience. C'est un problème considérable, bien plus important que le précédent. Le protocole opératoire de la physique consiste à tenter d'inférer des lois à partir de l'observation de régularités lors de la répétition d'expériences similaires. Constatant qu'une bille lancée à la surface de la Terre décrit toujours une parabole, on peut en déduire la loi du mouvement qui régit sa trajectoire. L'expérience « création de l'Univers » n'étant, tout au contraire, pas reproductible, comment savoir, dans les observations, ce qui relève d'aléas sans importance et ce qui relève de lois inévitables ? Si l'on tire cent fois à « pile ou face » et qu'on obtient cent fois « face », on peut en déduire que, probablement, la pièce est truquée ou qu'un phénomène spécifique l'oriente d'une certaine façon. Mais si l'on ne tire qu'une seule fois, que peut-on en déduire ? Le jeu devient extrêmement complexe. Ce n'est pas qu'un problème conceptuel, c'est une difficulté extrêmement concrète : les cosmologistes qui mesurent des propriétés du ciel doivent, dans leurs mesures, tenir compte de ce qu'il n'y a qu'un seul ciel à disposition. C'est une limitation drastique pour la cosmologie.

De plus, les « conditions initiales » jouent ici un rôle très particulier. La physique ne peut prédire la position de chute d'une pierre que si l'on spécifie la manière dont elle est jetée : sa vitesse et sa position primitives. C'est ce que les scientifiques nomment les conditions initiales. Elles sont toujours *extérieures* et *antérieures* à l'expérience considérée. Elles ne dépendent pas des lois de la science mais simplement des circonstances. Bien évidemment, elles sont essentielles : sans leur connaissance, il est impossible de prédire quoi que soit. Personne ne peut deviner où un projectile atterrira sans savoir où et comment il fut lâché. Or, précisément, le système Univers ne comporte ni extériorité ni antériorité. Pas d'avant, pas d'ailleurs. Qui peut donc fixer les conditions initiales essentielles aux

prédictions ? Comment ? La cosmologie fait face à cette terrible spécificité : les conditions initiales doivent être, en quelque sorte, « auto-générées » si le modèle entend être prédictif ! C'est un défi considérable.

Enfin, dans l'étude de l'Univers, c'est l'état actuel qui est connu et l'état primitif qui est recherché. Ce n'est pas un détail. Pour un système complexe, il n'est pas anodin de devoir remonter le cours du temps. Le film passé « à l'envers » ne ressemble pas au film passé « à l'endroit » : on n'a jamais vu une goutte de lait se reformer dans la tasse de café où elle fut versée, bien que ce soit, en principe, possible. Le sens du temps importe, les processus ne sont pas réversibles. Le désordre, dit-on, augmente inéluctablement. Extrapoler l'origine à partir de la destination est toujours un jeu à risque. Un jeu, pourtant, qu'il est impossible de ne pas jouer quand il s'agit d'explorer le commencement.

Sans même mentionner que les énergies en jeu dans les premiers instants du cosmos sont sans aucun doute beaucoup plus importantes que ce qui a jamais été – et que ce qui sera sans doute jamais – testé sur Terre. Il est extrêmement délicat d'extrapoler ainsi à un domaine d'énergie inconnu. Imaginons, par exemple, que nous connaissions bien les lois de la nature pertinentes pour décrire un feu de bois. À cette énergie particulière, c'est la chimie qui régit les processus. Il s'agit essentiellement des réagencements de liaisons électroniques entre les atomes. Que pourrait-on en déduire quant au fonctionnement d'une centrale nucléaire ou du cœur du Soleil ? Rien du tout ! Les lois de la physique subatomique, celles qui régissent les interactions entre les constituants internes des noyaux, ne se déduisent pas de celles de la chimie. Il y a donc quelque chose d'un pari un peu fou à supposer que notre connaissance actuelle de la physique (disons jusqu'aux énergies atteintes dans les accélérateurs de particules), permette de s'approcher du Big Bang aussi près que nous aimons à le croire !

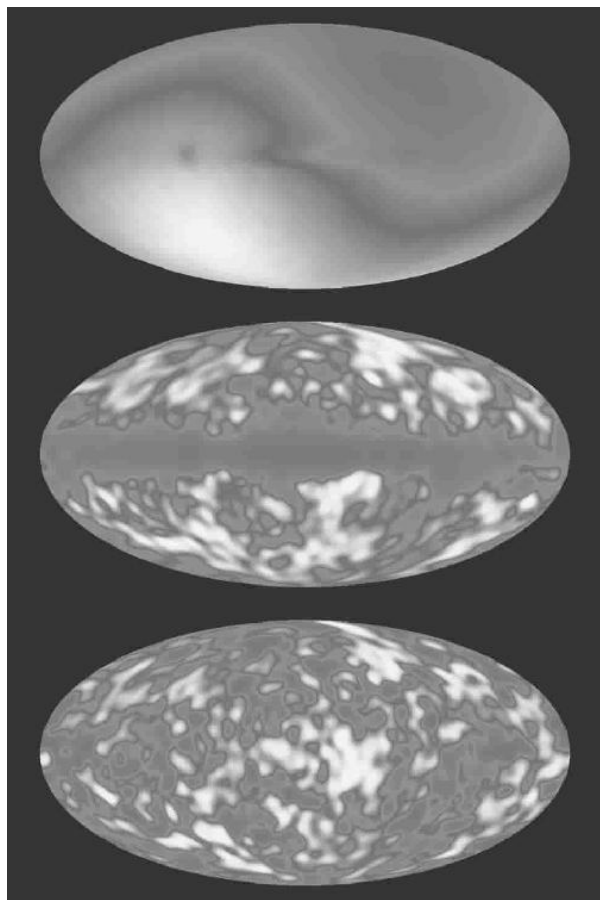
Pour toutes ces raisons, la possibilité même d'une cosmologie pourrait sembler compromise *a priori*.

Et pourtant

Le petit miracle de la cosmologie tient à ce qu'en dépit de ces difficultés – à moins que ce ne soit en partie grâce à elles –, elle s'est effectivement constituée comme une science, et même, comme une science de précision. Tout semblait plaider pour son impossibilité. Elle était vouée à demeurer une sorte de fantasme de physicien, antinomique avec la méthode de la science contemporaine. Aujourd'hui, pourtant, elle fait partie de la physique la plus orthodoxe

et se trouve enseignée dans tous les Masters d'astrophysique ou de physique des particules. Elle est une branche de la physique moderne et ses praticiens constituent une très large communauté.

S'il fallait dater cette entrée de la cosmologie dans le champ de la science « consensuelle » et institutionnelle (ce qui n'est pas forcément, en soi, une bonne chose !), je ferais remonter cet événement aux résultats du satellite COBE dans les années 1990. Bien évidemment, en un certain sens, la cosmologie accompagne la science depuis toujours mais ce n'est pas ce à quoi je fais ici allusion. Le « Cosmic Background Explorer » a permis de mettre en évidence la première lumière de l'Univers. Il a apporté des mesures exceptionnellement importantes et précises pour conforter le modèle du Big Bang. Je me souviens parfaitement de l'effet que firent sur moi ces magnifiques cartes bleues et roses où se dévoilait la structure de la première jeunesse de l'Univers. Outre sa qualité scientifique, cette expérience fut d'ailleurs aussi un petit coup de génie médiatique !

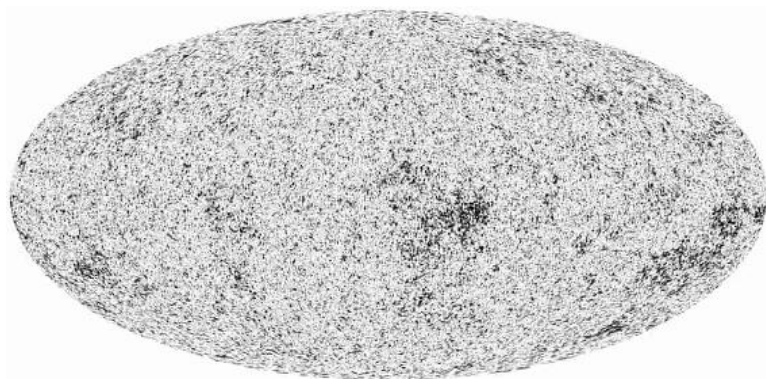


L'image supérieure représente ce qui est directement mesuré, la seconde représente le rayonnement fossile ainsi que notre Galaxie

et l'image inférieure, le seul signal cosmologique.

Images obtenues par le satellite COBE ayant fait entrer la cosmologie dans son ère de précision.

Quand ces cartes furent diffusées, j'étais élève au lycée Pasteur de Neuilly sur Seine. On ne peut pas dire que ce fut un sujet de conversation privilégié dans la cour de récréation ! Ni dans celle d'aucun autre lycée je suppose... Je porte aujourd'hui un regard ambivalent sur ces années. Mes parents, qui m'ont par ailleurs tant donné avec une générosité presque sans limite, y voient des circonstances exceptionnellement privilégiées ayant permis la poursuite de bonnes études supérieures.



La qualité de cette mesure est telle que l'on peut supposer qu'il s'agit d'une photographie définitive : le flou résiduel provient de l'Univers lui-même.

Image similaire, obtenue en 2013 par le Satellite Planck.

C'est tout à fait exact : pas de drogue, pas de racket, peu de violence... Et pourtant, je ne peux me départir de l'impression qu'il y manquait un élément fondamental de la pensée – de la vie peut-être : l'invitation à contester l'ordre établi. Ce microcosme était peut-être un cocon parfaitement lisse mais le réel est aussi un espace ouvert et rugueux. Il a ses devenir contestataires et libertaires, ses strates d'inévidences et de révolte. Je ne les ai jamais rencontrées là-bas et le risque d'une pensée effondrée sous son confort aveugle me semble finalement aussi réel que celui des prétendues « insécurités » en tous genres dont notre époque est devenue phobique. Bien sûr, on m'y enseigne les bases de la physique. Avec sérieux et compétence. Mais jamais l'étonnement, le doute, la subversion, la déconstruction et l'émerveillement qui,

toujours, doivent accompagner les élaborations et découvertes.

Les magnifiques résultats de COBE brillèrent donc avant tout par leur extraordinaire précision. Ils ont montré que la température de l'Univers suivait la loi attendue sans aucune déviation mesurable. Ce fut une avancée remarquable, une sorte d'évolution brutale du qualitatif au quantitatif. Un saut vertigineux. Mais ces avancées ne font sens que parce qu'elles viennent étayer un édifice en construction depuis plus d'un demi-siècle. La cosmologie contemporaine résulte d'une longue évolution. Elle se fonde sur des observations très nombreuses et sur une théorie d'une sidérante élégance. Il est impossible de comprendre le si étrange modèle du Big Bang sans connaître ses piliers. Il nous faut découvrir d'une part les multiples indices expérimentaux qui plaident pour cette étrange représentation du monde et, d'autre part, la grande théorie d'Einstein, la relativité générale, nécessaire pour percevoir la cohérence de l'édifice.

Les visages multiples du cosmos

« À la différence des arbres ou de leurs racines, le rhizome connecte un point quelconque avec un autre point quelconque, et chacun de ses traits ne renvoie pas nécessairement à des traits de même nature, il met en jeu des régimes de signes très différents et même des états de non-signes. Le rhizome ne se laisse ramener ni à l'Un ni au multiple. »

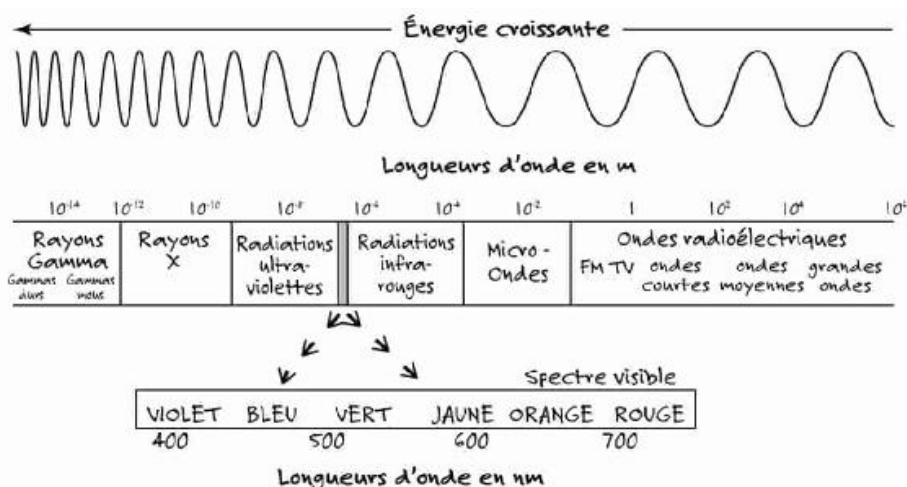
Gilles Deleuze et Felix Guattari, Mille Plateaux.

Fiat lux

À quoi le ciel ressemble-t-il quand on le regarde mieux ? Quel est le véritable aspect du cosmos ? Quelle serait l'apparence du firmament si nos yeux étaient nettement plus sensibles ? Ces questions sont essentielles pour la cosmologie. On ne peut comprendre l'Univers sans l'observer. Pourtant, il est impossible d'y apporter une réponse simple et non équivoque. Parce que, précisément, les visages de l'Univers sont multiples. Il n'existe pas de « carte » unique à laquelle se résume l'ensemble des images du monde. Cette irréductible pluralité contribue à mon sens à la singulière beauté de l'Univers.

La lumière est une onde caractérisée par sa fréquence. On peut aussi la voir comme un ensemble de « petits grains », les photons, caractérisés par leurs énergies. L'énergie d'un photon de lumière bleue est à peu près deux fois plus grande que celle d'un photon de lumière rouge : nos yeux sont ainsi sensibles à une gamme d'énergies extrêmement réduite. Il existe dans la nature des photons dont l'énergie peut être des milliers de milliards de fois plus grande ou plus petite que celle perçue par nos yeux. Le minuscule intervalle visible, représentant une gamme dont le maximum et le minimum ne diffèrent que d'un facteur deux, est à comparer au facteur gigantesque qui sépare les photons radio des photons gamma. Le rapport entre le visible et l'invisible est le même que celui entre l'épaisseur d'un cheveu et la taille d'une galaxie ! Ce cheveu, vu sur la tranche, représenterait les ondes que nos yeux peuvent percevoir. Cette immense galaxie représenterait les ondes qui nous sont invisibles mais dont l'existence est tout aussi réelle. C'est dire l'étendue de ce qui échappe à notre regard !

L'essentiel – pour ne pas dire la quasi-totalité – des ondes lumineuses n'est pas décelable par nos yeux. Nous n'accédons directement qu'à une quantité dérisoire d'informations. Nous sommes presque totalement « aveugles ».



Les ondes lumineuses

Mais si nos yeux ne voient qu'une part infime des ondes lumineuses, si notre cécité est avérée, comment se fait-il qu'ils nous permettent néanmoins d'observer tous les objets auxquels nous faisons face au quotidien ? Jamais nous ne heurtons un meuble invisible, au moins en plein jour ! La raison est élémentaire : la sélection naturelle darwinienne a conduit les êtres vivants à se doter de détecteurs (en l'occurrence d'yeux) adaptés à leurs besoins : nous voyons la lumière émise par notre étoile, le Soleil. Si nous étions à proximité d'une étoile émettant une lumière de plus haute énergie (une étoile plus chaude donc), il est évident que nos yeux seraient sensibles à ces ondes de plus haute énergie. Nous sommes en adéquation avec notre environnement direct. Mais, à l'échelle de la cosmologie, le Soleil n'est qu'un astre insignifiant. Pour tenter d'appréhender les autres visages du cosmos, tout aussi réels, il est donc indispensable de détecter ces ondes de grande ou faible énergie. Ces ondes invisibles mais bel et bien existantes. Ces ondes transportant des informations primordiales sur l'Univers mais qui nous sont absolument obscures. Nous vivons dans un bain de rayonnements cachés.

Cette extraordinaire diversité des images-du-monde que nous livre l'astrophysique contemporaine est au cœur de l'attrait de la (re)présentation scientifique de l'Univers. Moins que l'esthétique –

plastique ou chromatique – d'une des versions, c'est leur profusion qui me semble fascinante. Je reviendrai sur le rôle de la diversité en physique, à plusieurs occasions et en des sens très différents. Elle est souvent associée à une incompréhension ou à une incomplétude. Parfois même à une inquiétude. Je pense, tout au contraire, qu'elle devrait être envisagée comme un nouveau guide possible dans notre manière d'appréhender l'Univers.

Des basses énergies

Les ondes lumineuses de très basse énergie se nomment « ondes radio ». Ce sont les premières ondes non-visibles pour l'œil humain qui furent étudiées en astronomie : elles sont en effet quasiment les seules à pouvoir traverser l'atmosphère ! La couche d'air qui entoure notre planète est opaque à presque toutes les ondes sauf les ondes radio (et, naturellement, la lumière visible sans quoi nous ne pourrions voir le Soleil).

Les ondes radio ont révélé de nombreux processus « non thermiques » dans l'Univers. Il s'agit de phénomènes pour lesquels la production des ondes n'est pas liée à la température de l'objet qui les génère. Rien à voir donc avec ce qui se passe lors de l'émission de lumière par une étoile. En particulier, les ondes radio ont mis en évidence le rayonnement dit *synchrotron* qui, lui-même, témoigne de la présence de particules très rapides dans des champs magnétiques. On peut, à Grenoble par exemple, juste à côté du laboratoire où j'ai le plaisir de travailler, voir un grand instrument justement nommé Synchrotron : c'est le même effet. En accélérant des particules dans un champ magnétique, on les fait rayonner et on utilise ce rayonnement pour sonder la matière. Paradoxalement (puisque leur énergie est très basse) les ondes radio signalent ainsi la présence des plasmas les plus chauds du cosmos ! De plus, dès les années 1950, il apparut que les radiosources ponctuelles étaient des objets situés à l'extérieur de notre propre galaxie. Et, plus étonnant encore, l'émission radio associée à une galaxie lointaine n'émane généralement pas de la galaxie elle-même mais d'immenses lobes, causés par des jets de particules, qui se déploient de part en part... Beaucoup d'autres objets ont été découverts grâce aux ondes radio, à commencer par les fameux *quasars*. Ces astres sont si lumineux qu'ils ont longtemps défié l'imagination des astrophysiciens. On pense aujourd'hui qu'ils sont constitués d'un gigantesque trou noir engloutissant d'importantes quantités de matière. L'aspect de la voûte céleste, lorsqu'on l'observe avec les ondes radio, est donc extrêmement différent de celui qu'elle peut revêtir aux énergies « visibles », même si l'on use des plus puissants télescopes pour intensifier ces dernières.

À un peu plus haute énergie, dans le domaine des micro-ondes (ou, plus précisément, dans les domaines submillimétrique et millimétrique) le ciel est baigné du rayonnement fossile mesuré par COBE. Ces ondes sont extrêmement nombreuses : des milliers de milliards de photons de cette nature heurtent notre main chaque seconde ! Du point de vue cosmologique, ce rayonnement est extraordinairement important. Mais du point de vue esthétique, tout au contraire, le ciel est plutôt sans intérêt à cette énergie : il est presque parfaitement uniforme. Son aspect est le même dans toutes les directions. Un visage du monde morne et immensément brillant. Sans aucun lien avec celui des ondes visibles ou radios.

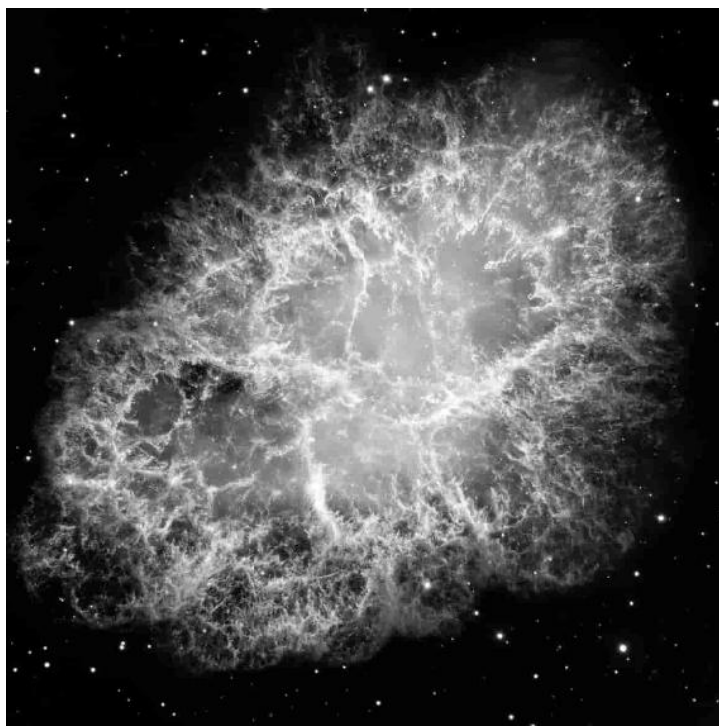
À plus haute énergie encore, s'ouvre le domaine des infrarouges dans lequel de nombreuses sources astrophysiques émettent l'essentiel de leur rayonnement. Il est important en cela qu'il révèle les zones de formation des étoiles, permettant de comprendre les mécanismes à l'œuvre dans l'émergence des structures stellaires. Certaines galaxies irrégulières produisent également des quantités colossales de rayonnements infrarouges. Comprendre l'Univers, tenter d'en forger une image un tant soit peu complète, demande donc de l'observer suivant toutes ces approches à la fois, et bien d'autres encore.

Aux hautes énergies

Au-delà de la minuscule fenêtre visible, s'ouvre le domaine des ultraviolets. Ces ondes permettent d'accéder à des objets très chauds, qui émettent à des températures plus élevées que celle du Soleil. Elles dessinent elles aussi un autre univers. Pour la cosmologie, les ultraviolets sont particulièrement importants parce qu'ils permettent de révéler un élément fondamental : le deutérium. Il est essentiel dans la mesure où, eu égard à sa fragilité, les étoiles ne sont pas capables de le synthétiser sans le détruire immédiatement compte tenu des conditions hostiles qui y règnent. Le deutérium aujourd'hui observé ne peut donc provenir que des premières secondes de l'Univers. Les ultraviolets mettent ainsi en évidence un signe, un vestige – comme une trace – des instants qui suivirent juste le Big Bang.

À plus haute énergie encore, dans le domaine des rayons X, se révèlent, entre beaucoup d'autres objets, des systèmes binaires où deux astres tournent frénétiquement l'un autour de l'autre. Ce sont des phénomènes très impressionnants et souvent catastrophiques. Des cataclysmes célestes. On peut ainsi, par exemple, découvrir des étoiles à neutrons dont la densité avoisine un milliard de tonnes par centimètre cube ! Cent mille milliards de fois supérieure à celle du plomb...

Les ondes de lumière les plus énergétiques jamais mesurées se nomment rayons gamma. Ils sont évidemment un moyen privilégié pour accéder à des processus exotiques dans l'Univers. Dans le domaine des rayons gamma « durs », celui des plus hautes énergies, le ciel est essentiellement noir. Ni le Soleil, ni les autres étoiles, ni bien sûr les planètes ne sont capables d'émettre de tels rayonnements. Sombre plérome. Étonnamment, pour des yeux sensibles aux rayons gamma, c'est un astre pourtant ténu dans le domaine visible qui s'imposerait comme nouvel astre du jour et étincellerait intensément : la nébuleuse du Crabe. Cette étoile à neutron irradiant le milieu interstellaire brillerait de mille feux dans le « ciel gamma » alors qu'elle est invisible à l'œil nu... Autre image, même ciel.



La nébuleuse du Crabe

Ces rayons gamma me fascinent depuis que j'en ai connaissance. C'est à eux que j'ai décidé de dédier ma thèse de doctorat en physique. Aujourd'hui, ce domaine, celui des astroparticules, est reconnu et établi. Il a pignon sur rue. Quand j'achevais mon Master, c'était au contraire une voie tout juste ouverte et très marginale. Mon responsable de formation m'avait conseillé, si je voulais espérer

obtenir un poste de chercheur ou d'enseignant-chercheur, de ne surtout pas m'engager dans cette recherche trop éloignée du courant principal et des priorités institutionnelles. Je crois que cet argument a achevé de me persuader de choisir ce sujet ! Pour mesurer les rayons gamma nous utilisons les cascades de particules qu'ils induisent dans l'atmosphère terrestre lorsqu'ils viennent la percuter. Leur énergie est si élevée qu'ils peuvent créer de grandes quantités d'électrons, eux-mêmes suffisamment énergétiques pour créer un flash de lumière bleue qu'on nomme lumière Cherenkov. C'est elle qui est mesurée au niveau du sol et permet de connaître l'énergie et la direction d'arrivée du rayon gamma initial. La méthode est très indirecte mais hautement efficace.

Pour mesurer la lumière Cherenkov, nous avons réutilisé les restes d'une vieille centrale solaire désaffectée installée par EDF dans les Pyrénées orientales. C'était assez artisanal ! D'autant que souvent les nuages arrivaient d'Espagne en fin d'après-midi et ne nous permettaient pas d'observer correctement... Mais, pour un coût modeste, avec un peu d'ingéniosité et beaucoup de nuits blanches, nous parvenions à mesurer ces rayons gamma et contribuions ainsi à l'ouverture d'une nouvelle astronomie. C'était extrêmement excitant. Et souvent exténuant durant les nuits d'hiver (les meilleures pour l'astronomie) : les sorties dans la neige avec oscilloscope et voltmètre sous le bras pour tenter de traquer – et si possible de dépanner – les dysfonctionnements étaient, il faut l'avouer, assez fréquentes. Il y avait quelque chose de grisant dans cette science à échelle encore humaine. Je me souviens parfaitement d'une nuit de printemps où nous avons assisté en direct à un sursaut d'émission gamma du quasar Mrk 501. Il s'agit d'un trou noir supermassif qui accrète d'importantes quantités de matière et émet des jets de particules ultra-énergétiques vers la Terre. À notre grande stupéfaction, son éclat s'est trouvé décuplé en quelques dizaines de minutes seulement, faisant de lui pendant quelques instants la source la plus brillante du ciel gamma ! Pour nous, les apprentis chercheurs aux commandes du télescope, cette « découverte » a aussi été l'occasion d'une immersion rapide dans les questions de sociologie des sciences. La première question que nous nous sommes posée, au cœur de la nuit, était : faut-il prévenir nos collègues et... concurrents ? Il existait deux autres observatoires gamma semblables au nôtre. Les mettre au courant de l'événement, afin qu'ils pointent leurs télescopes vers Mrk 501, était évidemment scientifiquement opportun. Mais était-ce politiquement correct ? Ne risquait-on pas de perdre l'exclusivité des bénéfices de cette observation exceptionnelle et donc de froisser nos responsables de recherche ? Nous avons heureusement, avec cette sorte de sagesse intuitive et seditieuse qu'il ne faudrait jamais perdre, pris la décision

d'informer les autres astronomes spécialisés. Je crois qu'ils avaient d'ailleurs, eux aussi, découvert le phénomène et nous avons pu combiner les observations de façon très probante pour mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre dans ces monstres de l'Univers que sont les quasars.

Des ondes radios aux ondes gamma, le firmament présente donc des aspects radicalement différents. Aucun d'eux ne prévaut sur tous les autres. La minuscule gamme visible à laquelle nos yeux peuvent accéder ne révèle qu'une infime partie des apparences du cosmos et donc des processus qui s'y déploient. L'Univers est intrinsèquement pluriel et l'incommensurabilité de ses différentes formes et couleurs contribue, je pense, à lui conférer sa singulière – bien que familière – étrangeté.

Et aux basses énergies à nouveau !

Étonnamment, il existe des liens forts entre les énergies. Le ciel des ondes gamma peut paradoxalement renseigner sur celui des infrarouges ! Utilisant une idée déjà émise par d'autres, nous avons mené une telle étude avec Cécile Renault, Guilaine Lagache et Jean-Loup Puget, le principal investigateur de l'expérience Planck qui, vingt ans plus tard, a magistralement remplacé COBE. Nous nous trouvions à l'école d'été de physique théorique des Houches. Jean-Loup y donnait un cours et j'étais alors étudiant. J'y suis retourné depuis lors, à plusieurs reprises, en tant que professeur à mon tour. C'est un lieu magique. À la tombée du jour, les aiguilles de la chaîne du Mont-Blanc dessinent un horizon ciselé, inquiétant autant qu'émouvant. La nuit, c'est plus extraordinaire encore : les montagnes se dessinent « en ombres chinoises ». Elles apparaissent par « défaut d'étoiles ». Le ciel est si pur et profond, qu'on devine les cimes enneigées via les astres qu'elles masquent ! L'école des Houches est un petit miracle : un lieu préservé. Les chambres ne ferment pas à clef, l'accès internet est quasi impossible, les participants sont (presque) contraints de demeurer cloîtrés plusieurs semaines et la nourriture y est... pittoresque ! Beaucoup de découvertes importantes ont été effectuées dans le cadre de cette école, en marge des cours. Autant, d'ailleurs, par les étudiants que par les enseignants !

L'idée était la suivante : les ondes gamma sont tellement énergétiques qu'en interagissant avec les ondes infrarouges elles peuvent créer des électrons. Mais ce processus a un coût : les ondes gamma sont perdues. On s'attendrait donc à observer un déficit d'ondes gamma à très haute énergie, quand ce phénomène devient important. Étant donné que ce n'est pas le cas, on peut en déduire que les rayonnements infrarouges ne peuvent pas être bien nombreux dans

l'Univers. La simple mesure des rayons gamma venant de quasars lointains, situés à des centaines de millions d'années lumières, nous apprend donc quelque chose de l'intensité des ondes infrarouges ! Bien sûr, l'analyse détaillée est longue et complexe, et fait appel à l'astrophysique, à la physique des particules autant qu'aux méthodes statistiques, mais l'idée directrice était simple. Et il ne s'agit pas que d'une mesure sans conséquence : elle permet de mieux comprendre l'ère de formation des galaxies durant laquelle les premières étoiles ont émis beaucoup de rayonnements qui se trouvent aujourd'hui dans ces énergies infrarouges. Tout est souvent plus ou moins relié en cosmologie et les informations indirectes peuvent se révéler plus essentielles et fiables que les observations directes. À supposer, d'ailleurs, que ces concepts aient un sens : on ne mesure que des interactions et jamais l'objet scruté « en lui-même ».

Particules cosmiques

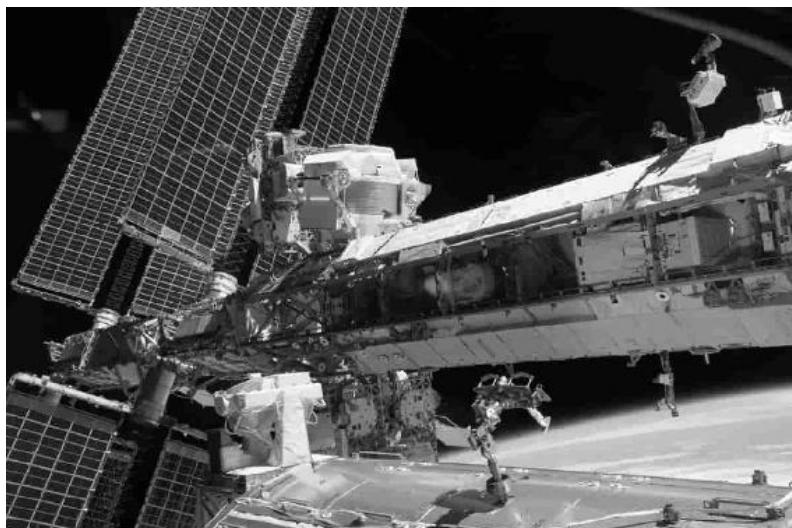
Les ondes électromagnétiques dessinent de nombreuses facettes différentes et complémentaires de la voûte céleste. Mais les photons ne sont pas les seuls médiateurs du cosmos. D'autres « véhicules », qui ne diffèrent plus seulement par leurs énergies mais aussi par leurs natures peuvent également être utilisés. Ils permettent d'accéder, là encore, à de toutes nouvelles informations et dessinent, une nouvelle fois, un autre monde autour de nous.

Les neutrinos sont des particules fantômes. Ils présentent une caractéristique exceptionnelle : ils n'interagissent pratiquement pas avec la matière qu'ils traversent. Ils peuvent donc s'échapper sans difficulté des objets qui les engendrent et se propager dans le milieu interstellaire ou intergalactique sans être affectés par d'éventuelles mauvaises rencontres. C'est une propriété fantastique. Ils ne sont pas dégradés ni absorbés : ils gardent donc l'empreinte des processus physiques qui les produisent. Une aubaine pour l'astrophysicien ! La lumière qu'on observe venant du Soleil ne provient, en réalité, que d'une très fine couche à la surface de celui-ci. Nous ne voyons qu'une pelure d'étoile. Et ce pour une raison simple : le Soleil n'est pas transparent à sa propre lumière. Les photons émis au cœur, là où la température avoisine 15 millions de degrés Celsius et où 500 millions des tonnes d'hydrogène sont chaque seconde brûlées en hélium, ne peuvent pas s'échapper et venir librement jusqu'à nous. Ils sont tout de suite réabsorbés. Tout au contraire, les neutrinos émis au centre – sur le lieu des réactions nucléaires – traversent sans difficulté le Soleil et atteignent, inaltérés, la Terre. Ils constituent donc une sonde irremplaçable pour comprendre, bien au-delà des étoiles, des astres exotiques. Ils constituent par exemple une véritable clef pour identifier

les particules émises par les quasars. Hélas, ce qui fait leur force fait aussi leur faiblesse... Si les neutrinos n'interagissent presque pas avec la matière, ils n'interagissent pas non plus avec les détecteurs ! Mais détecter, c'est toujours détecter une interaction. Une particule qui n'aurait strictement aucune interaction avec nous ne serait, en un sens qu'il faudrait définir rigoureusement, pas même « réelle ». Les interactions très faibles des neutrinos nécessitent donc la conception de détecteurs considérables qui compensent cette difficulté par leur gigantisme. Ce sont des détecteurs un peu étranges qui sont installés par exemple au fond des océans et regardent... sous terre ! Cela maximise la probabilité qu'un neutrino venant « d'en bas » interagisse dans la Terre et produise des particules secondaires qui sont ensuite détectées dans l'océan. Un tel détecteur est installé dans la mer Méditerranée, un autre dans les glaces de l'Antarctique. Si la méthode est prometteuse, les résultats astrophysiques spectaculaires se font encore attendre. Pour le moment, et à la grande surprise des physiciens, les détecteurs sont plus sensibles aux animaux marins bioluminescents qu'aux particules cosmiques ! L'aventure promet d'être longue et pleine de rebondissements. Mais, à n'en pas douter, les neutrinos permettront un jour d'élaborer une nouvelle « carte » du ciel, elle aussi très dissemblable de chacune des cartes utilisant les photons, fussent-ils de basse ou de haute énergie. D'ores et déjà, les expériences dédiées aux neutrinos solaires ont permis de montrer que ces particules élémentaires avaient une masse. Ce qui constitue une avancée importante du point de vue de la physique de l'infiniment petit.

Pour ma part, je me suis ensuite tourné vers l'utilisation d'autres particules cosmiques. Ni les neutrinos, ni les photons, mais les noyaux chargés : protons, hélium, béryllium... L'instrument AMS est un énorme détecteur de telles particules aujourd'hui placé sur la Station spatiale internationale. Il mesure ces « rayons cosmiques » à un rythme effréné de l'ordre d'un millier par seconde. La manière dont ils se propagent dans la Voie Lactée, notre galaxie, révèle des processus subtils mêlant ondes de choc et champs magnétiques. C'est un peu l'histoire de notre petit îlot d'Univers qui se déroule ici. Mais en contrepoint de cette magnifique aventure scientifique, je demeure circonspect quant à l'aventure humaine qui l'a rendue possible. Ces immenses expériences spatiales où plusieurs centaines de physiciens collaborent pendant plus de vingt années pour concevoir et exploiter un instrument génèrent parfois des situations tristes ou pénibles. D'une part parce que le coût et le prestige d'un instrument mis en place dans l'espace sont tels que les décisions échappent aux scientifiques. Les choix sont avant tout politiques. Dans notre cas, les changements de majorité aux États-Unis conditionnaient directement la poursuite de

l'expérience. Il va sans dire que l'Amérique républicaine de Bush était moins intéressée par la recherche fondamentale que l'État démocrate d'Obama... Sans compter les luttes de pouvoir et hostilités intestines entre membres éminents du DOE (le département de l'énergie américain) et de la NASA. Nous avons longtemps craint que ce remarquable instrument, ayant coûté tant d'efforts, ne vole finalement jamais. Aux espoirs, succédaient les déceptions et les inquiétudes. Heureusement, l'issue s'est avérée fructueuse ! Mais nous sommes passés tout près d'un gâchis de plus d'un milliard d'euros et surtout de deux décennies d'efforts acharnés. Ce n'est pourtant qu'un aspect du problème, et peut-être pas même le plus grave. Je suis en effet plus que dubitatif sur l'organisation très hiérarchisée de la recherche ici à l'œuvre. Le moins qu'on puisse dire est que le fonctionnement de la collaboration n'était pas exactement démocratique. Outre sa probable inefficacité scientifique cette situation est humainement inquiétante. Non pas, bien sûr, pour les chercheurs permanents comme mes proches collègues et moi-même : nous sommes structurellement prémunis contre ce genre d'aléas. Mais les étudiants, les physiciens russes ou chinois sous contrats à durée déterminée, corvéables à merci, ont fait les frais de ce système. Quelque chose d'assez profondément révoltant se jouait ici sous nos yeux. Quelque chose que l'on dénonçait sans véritablement pouvoir l'endiguer. J'en retiens que les chercheurs ne sont nullement à l'abri des dérives autocratiques et des bassesses en tous genres. Comme toute communauté humaine, celle des physiciens est traversée d'individualités humbles et remarquables autant que d'ego hypertrophiés... Ce qui, finalement, n'est pas étonnant.



Enfin, au-delà des neutrinos et des particules chargées, on peut aujourd'hui espérer détecter des ondes gravitationnelles. Il s'agit ni plus ni moins que d'observer directement la géométrie de l'Univers ! Ou, plus exactement, les ondes déformant légèrement cette géométrie. La démarche est extrêmement complexe parce que le phénomène est plus que ténu : ces ondes sont minuscules. Mais le jeu en vaut la chandelle puisqu'il s'agira, pour la première fois dans l'histoire, de voir le cosmos avec des yeux de géomètre. Ce que, précisément, Platon appelait de ses vœux. Sans aucun doute possible, un nouveau visage, radicalement différent de tous les autres, se révélera ici aussi... Ce champ astronomique est entièrement à défricher. Plus de quarante années d'efforts n'ont toujours pas permis d'enregistrer ces tressaillements de l'espace dont l'existence est pourtant avérée.

Des ondes radio aux photons gamma, des infrarouges aux ultraviolets, des neutrinos aux ondes gravitationnelles, chaque « médiateur » du cosmos dessine un autre monde. Tous ces mondes sont réels. Ils sont les facettes de notre Univers. Ils nous parlent de son passé, de son origine, parfois de son devenir.

Les fondements observationnels du Big Bang

« Il faudrait donc un corpus. Discours inquiet, syntaxe casuelle, déclinaison d'occurrences. Clinamen, prose inclinée vers l'accident, fragile, fractale.

Non le corps-animal du sens, mais l'aréalité des corps : oui, des corps étendus jusqu'au corps mort. »

Jean-Luc Nancy, Corpus.

Comment l'Univers pourrait-il ne pas être éternel ? On peut aisément admettre que les hommes naissent et meurent. Que les planètes naissent et meurent. Que les étoiles naissent et meurent. Que les galaxies naissent et meurent. Mais comment le contenant, l'espace lui-même, pourrait-il naître ou mourir ? La raison impose de penser un Univers éternel dans lequel se déploient des phénomènes temporels. C'est très exactement pourtant ce que vient contester le modèle du Big Bang. Bien que nous soyons maintenant habitués à cette idée de Big Bang, je pense qu'il est essentiel de ressentir à quel point elle est étrange. Que l'espace n'ait pas toujours été véritablement une proposition sidérante ! Pour ne pas dire délirante. Les astronomes ont été très durs à convaincre. Ce modèle ne s'est pas établi en un jour. Il n'a été accepté que très progressivement et avec la plus grande circonspection. Presque « par défaut » parce qu'il devenait finalement le seul tenable... Il repose sur de nombreux piliers.

Le paradoxe de Olbers

Le ciel de nuit est noir. Cette remarque désuète pointe en fait vers un véritable paradoxe. Si l'Univers était statique et éternel, plus ou moins uniformément rempli d'étoiles, il ne pourrait en être ainsi. Quand on observe le firmament, notre œil voit un « cône » d'Univers correspondant à l'angle d'ouverture de notre pupille. Or le nombre d'étoiles contenu dans une portion lointaine de ce cône est plus important et compense exactement le fait qu'elles sont moins lumineuses en raison de leur distance. Les contributions de ces petites portions s'ajoutent les unes aux autres. Autrement dit, si rien n'avait fondamentalement évolué et si l'Univers était infini, le ciel nocturne devrait être infiniment brillant. Ce qui n'est manifestement pas le cas.

Rien ici ne donne d'argument décisif en faveur du modèle du Big Bang. Mais cet état de fait montre au moins que l'image la plus intuitivement acceptable – un cosmos figé et existant de toute éternité – ne fonctionne pas. Il est intéressant que la première intuition d'une solution correcte à ce paradoxe, dit de Olbers, soit venue du poète et écrivain Edgar Poe⁶... De même, d'ailleurs, que la compréhension de ce que certaines nébulosités du ciel nocturne sont en fait d'autres galaxies (d'autres univers-îles comme on les appelait alors) provient non pas d'un grand astronome mais du philosophe Emmanuel Kant⁷ !

L'expansion

L'argument décisif, le plus évident, le plus incontournable, le plus simple aussi, est très certainement l'observation de l'éloignement des galaxies. Chaque galaxie observée dans l'Univers s'éloigne de chaque autre. Découvert, dit-on, par Hubble (mais, en réalité, plutôt par l'astronome américain Vesto Slipher ou même par le chanoine et physicien belge Georges Lemaître), ce phénomène est immensément lourd de conséquences. Il dessine immédiatement l'image d'un Univers en expansion, à l'instar d'une gigantesque bombe en explosion. Ces mesures sont fiables parce qu'elles se fondent sur une méthode élémentaire : l'effet Doppler. De même que le son du moteur d'une voiture qui s'éloigne nous semble plus grave, la lumière d'une source qui s'éloigne nous arrive plus rouge : cela correspond simplement à un changement de fréquence de l'onde. Actuellement, les millions de galaxies observées présentent un tel décalage vers le rouge et s'éloignent donc de nous, en accord avec le modèle du Big Bang. Il est remarquable de constater la très grande réfutabilité de ce modèle : il suffirait (à l'exception des plus proches pour lesquelles l'effet d'expansion est petit) qu'une seule galaxie s'approche de nous, ce qui se traduirait par un décalage vers le bleu, pour que tout l'édifice du Big Bang s'effondre ! Ce n'est pas le cas. Aucun effet de ce genre n'a été vu. La récession des galaxies, d'autant plus rapide qu'elles sont éloignées, n'a jusqu'alors jamais été démentie.

Les âges

Dès lors que l'on observe un univers en expansion, se pose inévitablement la question de son âge. Si, en effet, les points d'univers s'éloignent les uns des autres, il doit nécessairement (si l'on suppose cette vitesse approximativement constante) exister un instant où tous ces points se touchaient. Un instant que l'on nomme donc Big Bang (paradoxalement ainsi baptisé de façon moqueuse par Fred Holye, l'un des opposants à la théorie !) et qu'il est tentant de considérer comme

originel. À partir de la vitesse d'expansion observée, il est très facile d'inférer le temps qui nous sépare de cet événement primitif. Si l'on mène l'investigation de façon grossière, le résultat obtenu n'est évidemment qu'un ordre de grandeur puisqu'il n'y a aucune raison que la vitesse d'expansion de l'Univers n'ait pas varié au cours du temps. Mais cela donne une première idée et conduit à 13 milliards d'années environ. En lui-même cet âge n'est ni étonnant, ni naturel. Ce qui importe est de le comparer aux objets les plus vieux connus. Si ces objets sont plus âgés que l'Univers lui-même, cela signifie évidemment que le modèle est erroné. Au contraire, si tous les objets sont beaucoup plus jeunes que l'Univers lui-même, l'image est peu crédible puisqu'elle signifierait que seuls les derniers instants du cosmos ont été féconds.

La méthode dite du « carbone 14 » permet de dater les organismes ayant été vivants : à partir du moment où ils meurent, l'isotope carbone-14 synthétisé dans l'atmosphère n'est plus incorporé à leurs corps. Comme cet isotope se désintègre, avec un temps de vie de 6 000 ans, alors que l'isotope carbone-12 est stable, en mesurant la proportion de carbone-14, on peut en déduire le temps qui nous sépare de la mort de l'organisme considéré. Un peu comme si, à partir d'une population donnée d'individus dont on connaît l'espérance de vie, on évaluait le temps passé depuis leur naissance à partir du nombre de survivants. Une méthode proche de celle-ci peut être utilisée avec des isotopes de l'uranium, ayant un temps de vie nettement plus important, pour dater les plus vieilles météorites du système solaire. La valeur obtenue est de l'ordre de 5 milliards d'années, en étonnant accord avec l'âge naïvement inféré pour l'Univers. Mais on peut faire mieux encore et évaluer, par des modèles complexes d'évolution stellaire, l'âge des plus vieilles étoiles. La conclusion de ces études mène à environ 10 milliards d'années. C'est un résultat très convaincant en faveur du modèle du Big Bang : les objets présents dans l'Univers ont un âge qui est bien, comme il se doit, inférieur à celui de l'Univers lui-même mais, néanmoins, proche de celui-ci pour les plus vieux d'entre eux ! L'édifice semble maintenant singulièrement cohérent...

L'évolution

Étant donné que la lumière se déplace à une vitesse considérable mais finie, les objets lointains sont observés tels qu'ils étaient « dans le passé ». Une galaxie située à un milliard d'années-lumière est ainsi vue aujourd'hui depuis la Terre telle qu'elle était il y a en fait un milliard d'années. (En réalité, pour des raisons subtiles de définition du temps en relativité cette manière de parler n'est pas tout à fait exacte, mais

elle convient en première approximation.) Or, en étudiant en particulier des galaxies émettant beaucoup d'ondes radios, des « radiogalaxies », il apparut que les plus proches différaient des plus lointaines. Autrement dit, puisque voir loin c'est voir tôt, une évolution temporelle a eu lieu. C'est un argument crucial. Si l'Univers existait de toute éternité, il n'y aurait aucune raison de se trouver en plein cœur d'une phase d'évolution. Très certainement un état d'équilibre aurait été atteint et plus rien de décisif ne se passerait. Tout au contraire, dans un modèle de Big Bang, il est légitime d'attendre un aspect du cosmos évoluant aujourd'hui encore, tout comme on l'observe effectivement.

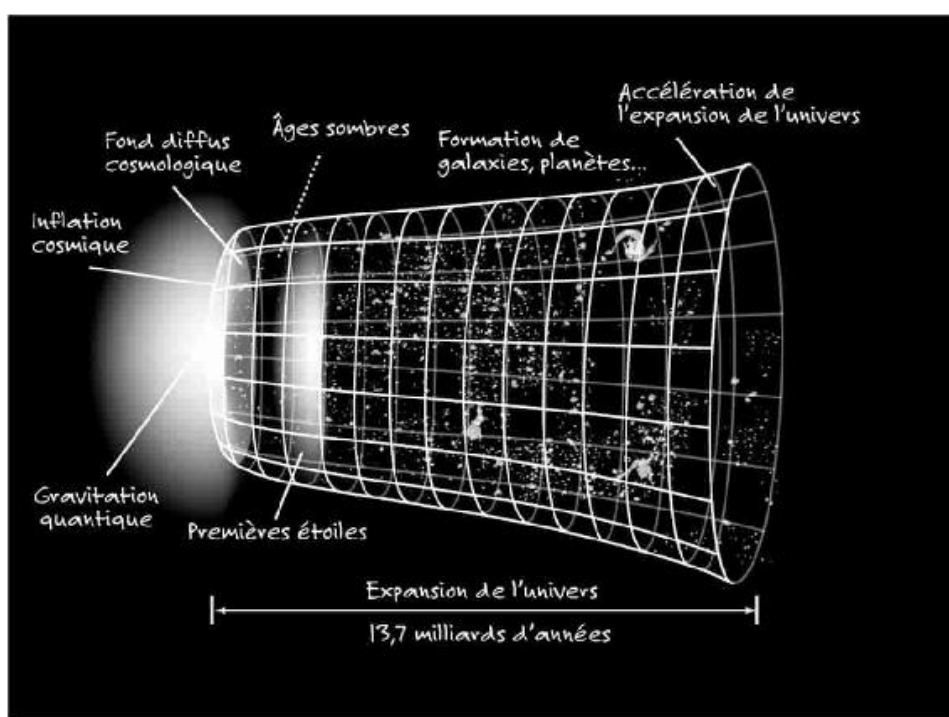
La nucléosynthèse primordiale

La physique nucléaire est une science bien maîtrisée. On peut, grâce à elle, prédire ce que devraient être les abondances des différents atomes dans un modèle de type Big Bang. Les calculs sont complexes. Les mesures ne le sont pas moins car les étoiles fabriquent elles aussi des noyaux et il est délicat de bien distinguer ce qui fut réellement synthétisé dans les premiers instants de l'Univers de ce qui est effectivement produit dans les étoiles. Mais aujourd'hui ces études sont très sophistiquées et, à l'exception d'une légère tension pour le lithium-7 (un noyau comportant 3 protons et 4 neutrons), l'adéquation entre les prédictions et les mesures est remarquable. Ce bon accord entre les observations et les contraintes imposées par le modèle du Big Bang est un élément central et subtil en sa faveur. Cette nucléosynthèse s'est entièrement déroulée durant les quelques minutes qui suivirent le Big Bang. Elle est donc une sonde de l'Univers très ancien et constitue, à ce titre, un pilier essentiel de l'ensemble du scénario. Elle implique davantage la physique de l'infiniment petit que l'astrophysique et représente de ce fait un argument complémentaire. La proportion des différents éléments est très sensible aux paramètres du modèle : l'accord entre la théorie et les « faits » constitue par conséquent une preuve – ou, plutôt, une épreuve – particulièrement pertinente. C'est un aspect important : changer radicalement l'image du monde ne se fait pas simplement. Pour qu'une révolution scientifique de l'envergure de celle du Big Bang advienne, il est indispensable que de très nombreux indices croisés plaident en sa faveur. Le jeu de la science est toujours un jeu de piste, un jeu de signes. Une sémiotique autant qu'une physique. Et ces traces doivent se corroborer les unes les autres pour conduire à l'émergence d'un nouveau cadre. La physique des particules épaula et sous-tend l'astrophysique. Elle offre ici au modèle l'un de ses pilastres décisifs.

Le rayonnement fossile

Le rayonnement fossile est sans doute la découverte la plus importante de la cosmologie contemporaine. La mise en évidence d'un bain de « lumière » emplissant tout l'Univers, de façon très homogène, et présentant exactement l'énergie attendue – en l'occurrence de 2,7 K (soit environ $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) – est un immense succès et une confirmation éclatante du Big Bang. Le satellite COBE en a mesuré, avec une précision incroyable, la dispersion en température. Les observations suivent les prédictions avec une exactitude qui dépasse l'entendement. La structure du jeune Univers se révèle ici directement. Si l'Univers était un être humain, c'est son visage à la fin du premier jour qui serait ainsi scruté.

L'histoire ne s'est pas achevée avec le succès de COBE. Un second satellite, WMAP, est allé beaucoup plus loin : il s'est intéressé plus en détail aux infimes différences de températures que présente ce rayonnement dans des directions différentes. C'est un effet minuscule. Et pourtant, il recèle une quantité phénoménale d'informations sur l'Univers primordial. En étudiant la distribution de ces petites distorsions, il est possible de mesurer l'essentiel des paramètres du modèle cosmologique : on peut connaître l'âge de l'Univers, sa masse (par unité de volume), sa vitesse d'expansion, la quantité de matière qui le compose, et beaucoup d'autres choses encore. Cet axe de recherche s'est avéré si fabuleusement fructueux qu'une troisième génération de satellites a été construite. C'est donc aujourd'hui Planck, un satellite de l'ESA (agence spatiale européenne), qui donne les meilleurs résultats concernant le rayonnement fossile avec une sensibilité plusieurs centaines de fois supérieure à celle de WMAP. Il permet d'affiner encore notre description quantitative du modèle du Big Bang et de construire une cosmologie de haute précision. Une quatrième génération, focalisée sur des propriétés plus subtiles encore (la polarisation du rayonnement fossile) est d'ores et déjà en préparation !



Représentation schématique de l'histoire de l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à l'époque actuelle

Au-delà de ces observables bien connues, plusieurs autres approches – plus techniques et moins intuitives – viennent aujourd'hui corroborer le modèle cosmologique standard. Il est étayé par des données très différentes les unes des autres. Cette idée folle, cet incompréhensible Big Bang, s'est peu à peu imposée comme notre meilleure image du cosmos.

Le Big Bang est-il une nouvelle Genèse ?

L'un de mes oncles, Claude Nuridsany, est biologiste, poète et cinéaste (réalisateur, avec sa femme, de *Microcosmos*, *Genesis* et *La Clé des Champs*). Son épouse et lui ont joué pour moi un rôle considérable et c'est en grande partie à eux que je dois mon attirance pour la science. Sans doute aussi pour une certaine littérature. Leur rapport au monde attentif et sensible est pour moi infiniment réconfortant. Pouvoir connaître les détails savants de l'anatomie d'un insecte sans jamais le réduire à un automate mécanique décrit par une longue locution latine. Tout est là. Ne rien perdre, dans la connaissance scientifique, de l'ingénuité émerveillée du regard que l'on peut poser sur ce petit

être est proprement magnifique. Essentiel et exigeant. Mon autre oncle, Michel, est critique d'art. Bien que mon admiration pour son érudition soit évidente, mes rapports avec lui sont plus complexes. Plus ambigus, plus conflictuels parfois, parce que j'aimerais qu'il considère ses choix et options comme des postures « réfutables en doute » (pour une fois, soyons cartésiens⁸ !), de façon moins normative. Ce qui ne signifie bien évidemment pas que l'art serait pour moi moins important que la science. Tout au contraire ! À supposer, d'ailleurs, que cette distinction ait réellement un sens, ce que je ne crois pas. Je me souviens avec délectation de l'organisation d'une des expositions des Rencontres internationales de la photographie d'Arles dont il m'avait confié la responsabilité, l'année où il fut directeur du festival. J'y ai rencontré plusieurs artistes avec lesquels j'ai entretenu des échanges réguliers et fructueux, qui ont sans doute contribué à abolir quelques clivages et à créer d'improbables porosités. Récemment, nous discutons du modèle du Big Bang et mon oncle objectait que nous avons, en fait, peut-être réinventé la Genèse en termes scientifiques. Nous aurions, en quelque sorte, traduit la Bible (le texte qui, avec *Illiade*, vertèbre la culture occidentale) dans le langage de la physique d'aujourd'hui. Un indien, me disait-il, serait sans doute mené à établir une tout autre cosmologie. Je pense que cette objection n'est pas exacte. Le modèle du Big Bang, celui d'un univers en expansion depuis un éventuel instant initial, n'a pas été inventé de toutes pièces pour satisfaire à une image préétablie. C'est même exactement l'inverse. L'Univers statique et éternel semblait tellement plus acceptable que ce n'est que quand ils n'eurent plus d'autre choix que les astronomes, y compris indiens, commencèrent à considérer sérieusement le Big Bang. La « découverte » de ce modèle a surpris, pour ne pas dire choqué. C'est peut-être cela la grande magie de cette démarche scientifique : elle rend la surprise inévitable. Elle met aux prises avec l'inattendu radical.

Il est difficile, et peut-être inutile, de définir ce qu'est exactement la science. Elle n'est évidemment pas la recherche de la Vérité. De la Vérité « majuscule », de la vérité unique et absolue. La seule chose que l'on sache avec certitude d'une proposition scientifique est, précisément, qu'elle est fausse. Nécessairement. Par définition de la démarche scientifique, toute posture, tout paradigme⁹, sera un jour remplacé par un meilleur cadre, jugé plus adéquat. Aucun énoncé scientifique – à la différence, par exemple, d'un énoncé théologique – ne peut prétendre à une justesse absolue. Ce perpétuel mouvement qui ôte à la physique toute possibilité d'accès à une vérité totale et englobante est définitoire de la science. La science ne dit pas le Vrai. Pourtant, la physique n'énonce évidemment pas non plus « n'importe quoi ».

Ce qui caractérise cette démarche n'est ni une visée ni une méthode. Je crois que c'est une tension. Une tension entre, d'une part, l'immense liberté dont jouit le chercheur et, d'autre part, cette altérité absolue qui s'impose, parfois avec violence, lors de la découverte. Il y a incontestablement quelque chose de démiurgique dans l'élaboration d'un modèle scientifique. Une description du monde est évidemment aussi la création d'un monde. Mettre une théorie sur pied ou même donner sens à une observation exige une immense liberté et une belle capacité d'invention. Mais, en parallèle, force est de constater que ce qui est vu n'est pas toujours ce qui était attendu. Ce qui est découvert n'est pas toujours ce qui était supposé. Peut-être même n'est-ce jamais exactement le cas. Une « extériorité » radicale semble être ici en mesure de reprendre ses droits. Ce subtil mélange entre le geste créatif du scientifique, finalement assez peu contraint, et la surprise qui, inéluctablement, se révèle lorsque le réel est plus intensément ou plus judicieusement scruté est sans doute constitutif de la spécificité de la démarche.

Bien sûr, les élaborations scientifiques sont socialement déterminées. Notre modèle cosmologique n'est évidemment pas insensible au contexte sociétal dans lequel il se dessine. Ce qu'a, par exemple, montré Bruno Latour¹⁰, actuellement directeur de la recherche à Science Po. Curieusement, son regard d'anthropologue sur les pratiques scientifiques, sa manière de souligner que le premier rôle de la science est de « créer des êtres nouveaux » plus que de révéler le monde en tant que tel, lui ont valu une réputation d'ennemi des sciences. Je pense tout au contraire que cette attention au contexte, cette manière de souligner la contingence des mécanismes de production du savoir, contribue à une louable entreprise de réflexion sur les pratiques discursives dans lesquelles la science se déploie inexorablement. Mais, bien évidemment, que la physique soit une proposition humaine, signifiante suivant des circonstances culturelles et historiques particulières, sans lien avec l'absolu, qu'elle doive se lire suivant ce que Michel Foucault nommait judicieusement un scepticisme ou un perspectivisme¹¹, n'implique évidemment pas qu'elle ne soit qu'un jeu de pouvoir ou un concours de rhétorique. Il y aurait quelque chose d'un cynisme aveugle et malveillant à n'y lire qu'une joute entre les ego des grands esprits d'une époque. Elle dit quelque chose du monde. Quelque chose de correct. Quelque chose qui n'est pas une simple tautologie. Mais elle le dit suivant une vérité qui est, elle-même, construite et contractuelle, réfutable et mortelle. Lorsqu'une manière particulière d'interroger le réel a été choisie, les conclusions sont largement objectives, au moins manifestement intersubjectives. Mais cette manière est, quant à elle, tout à fait arbitraire. Un peu comme si, plus qu'une « chose », le monde était une

« réponse ». À une question posée, celle-ci est généralement non équivoque. Mais les manières d'interroger sont, elles, infiniment nombreuses...

Les fondements théoriques du Big Bang

*« Tout questionner est un chercher. Tout chercher tire de ce qu'il recherche la direction qui précède et guide sa démarche. Questionner, c'est, sur le plan de la connaissance, chercher, chercher l'étant quant au fait qu'il soit et quant à son être tel. »
Martin Heidegger, Être et Temps.*

Un ensemble d'observations ne suffit pas à faire un modèle. D'abord parce que l'idée même d'une observation « pure » est caricaturale et même impossible. Toute observation est menée et interprétée dans un paradigme, un cadre de pensée. Elle n'est jamais une donnée vierge et absolument objective. Si nous vivions en Egypte antique, il n'y a aucun doute que nous verrions – comme un fait expérimental apparemment incontestable et objectif – le dieu Rê arpenter chaque jour le ciel dans sa barque solaire. Ce qui est vu n'est vu que suivant une manière possible de voir (le modèle du Big Bang n'est pas arbitraire, loin s'en faut, mais le geste scientifique qui l'engendre n'est bel et bien qu'un choix dans le magma des rapports au réel possibles). Mais, surtout, parce qu'élaborer une représentation du monde c'est inventer un discours dans lequel ces observations intriquées et imbriquées vont prendre sens. Dans le cas de la physique, ce discours est de nature mathématique. Le « miracle » de la cosmologie contemporaine vient de ce que concomitamment aux mesures laissant entrevoir l'expansion du cosmos, une nouvelle théorie, dans laquelle ce phénomène allait devenir réellement compréhensible – et même inévitable –, voyait le jour : la relativité.

Les ingrédients de la relativité restreinte...

Pour repérer la position d'un objet, on utilise en physique quatre nombres : ses coordonnées. Trois de ces nombres correspondent à la position dans l'espace (par exemple la latitude, la longitude et l'altitude) et un à la position dans le temps (par exemple la date). Évidemment, la valeur de ces coordonnées dépend du repère dans lequel on les mesure. Si, par exemple, on fixait l'origine des longitudes

à Paris plutôt qu'à Greenwich, les coordonnées des villes ne seraient évidemment pas les mêmes. De même que les dates ne sont pas les mêmes dans le calendrier hébraïque et dans le calendrier grégorien. Il est alors légitime de se poser une question en apparence anodine : comment les coordonnées se transforment-elles quand on change de repère ? Plus précisément : comment se transforment-elles quand on passe d'un référentiel dit « galiléen » à un autre ? Ces référentiels sont des systèmes d'axes tels qu'une particule qui n'est soumise à aucune force se déplace à vitesse constante. Ils jouent un rôle particulièrement important en physique. On peut facilement se convaincre que le référentiel terrestre est à peu près de ce type. Un palet lancé sur de la glace et ne subissant presque aucune force (son poids est compensé par la réaction du sol et les frottements sont faibles), continue en effet de se mouvoir sur celle-ci à vitesse quasi constante. De même si l'on décide de sauter à pieds joints dans un TGV avançant à grande vitesse, bien que notre corps ne touche plus le train, il continue évidemment à avancer avec lui : on retombe au même endroit sans, heureusement, s'écraser au fond du wagon ! Manifestement, dans ces référentiels, les corps qui ne sont soumis à aucune force continuent bien d'avancer à l'identique. C'est la loi de l'inertie : l'état naturel du mouvement consiste à « poursuivre » le même mouvement.

Cette question, celle de la transformation des coordonnées quand on change de référentiel, semble technique et peu attirante. Elle ressemble à l'un de ces exercices formels et pénibles qui découragent la curiosité scientifique des collégiens et ne servent qu'à satisfaire les velléités sadiques d'un vieux professeur acariâtre ! Il s'avère pourtant que, tout au contraire, l'enjeu de cette question est crucial. La réponse porte très au-delà d'un petit jeu conceptuel ou mathématique. Elle modifie drastiquement notre représentation du monde.

Et il est remarquable que l'on trouve une unique – et intuitivement très surprenante ! – réponse à cette question en se fondant presque exclusivement sur les symétries de la nature, c'est-à-dire sur quelque chose de très simple et fondamental. Ces symétries sont les invariances par déplacements spatiaux et temporels. Bien sûr, le contenu de l'Univers dépend du lieu et du moment, mais les lois, elles, n'en dépendent jamais. C'est le point nodal. Quand Isaac Newton énonce les *Principia Mathematica*, il ne les suppose bien évidemment pas seulement valables à Cambridge et en l'an de grâce 1687, mais aussi partout ailleurs, mais aussi dans le passé et le futur. Les phénomènes, les objets, dépendent du « où » et du « quand », tandis que les lois qui les régissent, elles, sont invariables. Cette propriété est presque l'essence d'une loi : le courant dans un circuit électrique peut bien varier avec le temps mais le fait que la tension aux bornes d'une résistance soit donnée par le produit de la valeur de celle-ci et de

l'intensité du courant qui la traverse demeure vrai en toutes circonstances. Ces remarques élémentaires sur les symétriques, presque évidentes – énonçant finalement la condition de possibilité d'une physique – permettent, moyennant quelques calculs, de déterminer les transformations possibles pour les coordonnées lorsqu'on change de référentiel ! La réponse à notre question s'obtient simplement, avec un peu de mathématiques, à partir de ces seules considérations sur les symétries. C'est donc une réponse particulièrement fiable. Elle ne repose sur aucune hypothèse audacieuse. On nomme les lois de transformation des coordonnées résultantes des transformations de Lorentz (en l'honneur du physicien néerlandais du début du XX^e siècle les ayant construites).

...et ses effets !

Ces transformations de Lorentz changent radicalement notre image usuelle de l'espace et du temps. Elles montrent, par exemple, que la durée n'est pas une grandeur absolue. Le temps « se dilate ». Si l'on mesure un an entre deux événements, un observateur en mouvement par rapport à nous pourra mesurer neuf mois. Ou une minute. Ou une fraction de seconde si sa vitesse est suffisante. Quelle est la « vraie » durée ? Il n'y a pas de réponse à cette question. Tout dépend du référentiel... La réponse est *relative* à la manière de mesurer. Si l'on synchronise sa montre avec celle d'un ami, après un voyage en avion effectué par l'un de nous, ou même une simple balade, elles ne seront plus tout à fait synchronisées. Bien sûr, l'effet sera très petit – bien que réel – parce que nos vitesses sont, au quotidien, très faibles devant celle de la lumière. Mais si nous nous déplaçons suffisamment rapidement, ces effets pourraient devenir gigantesques. Deux jumeaux n'auraient naturellement plus le même âge si l'un d'eux faisait un voyage dans une fusée rapide avant de rejoindre son frère. Chacun d'entre nous pourrait même devenir plus âgé que ses propres parents (si tant est qu'ils soient encore en vie) : il suffirait que ces derniers soient soumis à une vitesse suffisante par rapport à nous. Pendant que 40 ans s'écouleraient pour nous sur Terre, une seule année, par exemple, s'écoulerait dans leur vaisseau. À leur retour, ils seraient moins âgés que leurs enfants. Autrement dit : les voyages dans le futur sont évidemment possibles. Et même sans aucune limite du point de vue physique.

Si l'on disposait d'une technologie capable d'accélérer un homme à 1 g (c'est-à-dire une très agréable gravitation artificielle lui permettant de vivre sans difficulté dans un vaisseau) pendant les 80 années de sa vie, il se passerait, lors de ce voyage environ 10^{36} années sur Terre ! Autrement dit cent millions de milliards de milliards de fois l'âge de

l'Univers. À son retour sur notre planète... notre planète aurait disparu depuis longtemps ! Naturellement, le coût énergétique d'un tel voyage est tellement démesuré qu'il est strictement inenvisageable d'un point de vue concret. Mais, avec de petites particules beaucoup plus légères, nous observons tous les jours ces voyages dans le futur. Par exemple, au niveau du sol, on peut détecter environ 200 « mésons mu » par mètre carré chaque seconde. Ce sont des électrons lourds créés par les rayons cosmiques dans la haute atmosphère. Le calcul du temps qu'il leur faut pour venir jusqu'à nous conduit à une durée environ dix fois plus grande que leur temps de vie. Il ne devrait donc pas être possible de les voir. Sauf, bien sûr, à prendre en compte que, du point de vue de ces mésons mu, le temps qui s'est écoulé est en fait très inférieur à leur durée de vie ! La durée est relative : elle dépend du référentiel dans lequel on la mesure. En parallèle de cette dilatation du temps, se produit d'ailleurs une contraction des longueurs : la taille d'un objet en déplacement rapide diminue lorsqu'elle est mesurée par un observateur au repos. Ce n'est pas une force qui agit sur l'objet : c'est un effet géométrique, strictement indépendant de la composition du corps considéré, peu importe qu'il s'agisse de bois ou d'acier trempé.

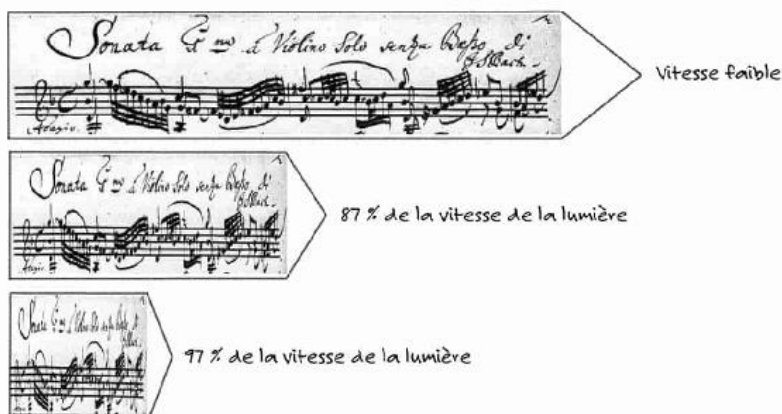


Illustration de la contraction des longueurs en relativité restreinte présentant la manière dont apparaîtrait une fusée transportant le manuscrit de la sonate pour violon n°1 en sol mineur de Bach, en fonction de sa vitesse

Ce que nous montre véritablement la relativité restreinte, c'est que l'espace et le temps ne peuvent pas être considérés indépendamment l'un de l'autre. Seul l'espace-temps fait sens. En fait, ce qu'un observateur identifiera comme de l'espace, un autre observateur, en mouvement, le verra comme du temps. L'espace et le temps peuvent se

changer l'un en l'autre. Il n'y a pas de différence essentielle les séparant. C'est une immense révolution ! Un tel phénomène peut aussi être aperçu, par exemple, avec un champ électrique et un champ magnétique. Un observateur à l'arrêt par rapport à un fil voit des électrons en mouvement et donc un champ magnétique. Un autre observateur, se déplaçant à la vitesse des électrons voit des charges fixes et, donc, au même endroit que le précédent observateur, un champ... électrique. Il n'y a pas de différence ontologique, c'est-à-dire liée à l'être « en tant qu'être », entre espace et temps, entre champ électrique et champ magnétique. Ils ne sont que différents aspects d'une même entité sous-jacente. Un peu comme si nous considérions un petit cylindre de bois. En le regardant par-dessus, nous voyons un disque. En le regardant de côté, nous voyons un rectangle. Ces deux figures, comme l'espace et temps, sont des visions partielles d'une structure plus profonde : le cylindre dans un cas, l'espace-temps dans l'autre.

Non contente de transfigurer notre compréhension de l'espace et du temps, la relativité restreinte a également ouvert la porte à la compréhension de beaucoup d'autres phénomènes. À commencer par le fameux « $E = mc^2$ » qui établit une équivalence entre la masse et l'énergie. Il s'agit pourtant de grandeurs de natures apparemment différentes : la masse est liée à l'être des particules tandis que leur énergie n'est qu'une propriété susceptible de varier. Cette égalité ouvre donc la possibilité à la transmutation d'un accidentel en essentiel, d'un acquis en inné, d'un avoir en être. C'est ce qui est effectivement à l'œuvre dans un accélérateur de particules : le mouvement des corpuscules incidents est transmué en existence, réelle et matérielle, de nouveaux corpuscules, éventuellement sans détruire les premiers ! L'existence d'antimatière constitue l'une des nombreuses autres conséquences de cette formule spectaculaire. Elle fut « inventée » par Paul Dirac en 1928 et découverte expérimentalement dès 1932. En ce sens, l'antimatière n'est pas si mystérieuse : elle est constituée de particules portant une charge électrique opposée et présente cette curieuse propriété de s'annihiler lorsqu'elle est mise au contact de matière. Bien que Richard Feynman ait interprété, de façon un peu imagée, l'antimatière comme de la matière remontant le temps, elle ne pose pas de problème conceptuel particulier et constitue une prédiction remarquable, parmi tant d'autres, de la relativité.

Enseigner la relativité

Étonnamment, la relativité est peu connue. Hors des étudiants ayant suivi un cursus poussé en physique, presque personne ne sait que les voyages dans le temps (dans le futur) sont possibles, que les distances

se contractent, que l'espace et le temps sont des notions relatives. La plupart des élèves ingénieurs – supposés bénéficier d'une formation scientifique d'excellence – n'apprennent pas cette théorie pourtant très bien corroborée par l'expérience et mathématiquement simple. Elle est unanimement reconnue comme l'une des fondations essentielles de notre science. La grande majorité des étudiants en philosophie travaillant sur le concept de « temps » ne la connaissent pas non plus. C'est étonnant. La relativité n'est pas un détail, elle est l'un des deux piliers de notre physique. Elle remet très profondément en cause notre compréhension du réel. Elle est une sorte de cadre dans lequel doivent s'exprimer nos propositions scientifiques. Elle constitue l'une de nos assertions sur le monde les plus fiables et les plus importantes. Je crois que la principale raison d'être de cette curieuse situation vient du caractère très « technocratique » de l'enseignement français. Ce sont toujours les applications pratiques ou, à l'autre bout de la chaîne, les mathématiques utilisées comme simple outil de sélection, qui priment.

La science « enchantée », à découvrir par tâtonnements, à comprendre comme une succession d'erreurs corrigées, à appréhender comme l'histoire réjouissante de nos constructions et déconstructions, de nos paradigmes effondrés et réchafaudés, en interaction constante avec les autres sphères culturelles, n'est pas au programme ultra-dogmatique de nos lycées et de nos universités. Même les mathématiques, la « discipline reine », souffrent de cet état de fait. Elles devraient être un espace de liberté extraordinaire ! En mathématiques, on peut tout inventer tant qu'on respecte quelques règles élémentaires. Les plus étonnantes fantaisies y sont permises, pour ne pas dire requises. Comme le disait Michael Atiyah, l'un des plus grands mathématiciens vivants, lauréat de la médaille Fields (l'équivalent du prix Nobel) et du prix Abel, il faut, en mathématiques, chercher la vérité et la beauté mais, en cas de doute, choisir la beauté. Les mathématiques sont le lieu de créativité le plus débridé qu'on puisse imaginer. Comment ne pas rêver de jouer avec l'infini, de construire des structures, d'inventer des objets ? Voilà ce à quoi invitent les mathématiques. Pourtant, elles sont la « bête noire » de tant d'élèves qui n'y voient – et ce n'est pas leur faute – qu'un enseignement coercitif consacré à la résolution de problèmes techniques sans intérêt réel. Notre enseignement des mathématiques n'est pas seulement trop élitiste ou exigeant, il est aussi infidèle. Infidèle à l'esprit même de cette science.

Ce qui m'étonne et me révolte, c'est cette hégémonie imposée. Celle des technologies directement applicables au détriment des sciences fondamentales, d'une part, celle des mathématiques dévoyées en outils de sélection au détriment de leur pendant créatif et exaltant, d'autre part. Celle, plus inquiétante encore, des sciences dures sur toutes les autres disciplines. Il est proprement ahurissant de constater à quel

point l'art, par exemple, est malmené dans notre système éducatif. Il pourrait en être la clef. Je rêve d'un enseignement dé-hiérarchisé où la découverte de la physique d'Einstein côtoierait celle des fugues de Bach, où la mathématique de Thalès jouerait avec les abstractions de Kandinsky, où l'évolutionnisme de Darwin converserait avec la poésie des aèdes grecs, où la philosophie analytique ne dénigrerait pas le rap et les arts de la rue. Pourquoi l'école n'est-elle pas avant tout le lieu où l'on favorise les interrogations, les inventions, les regards étranges et décalés ? Le lieu où l'en encourage à décadrer et désencastrer les idées reçues et vieilles rengaines réactionnaires ? Ou peut-être plutôt le non-lieu où la pensée apprendrait à s'extraire des carcans et à déchirer les horizons ? Pourquoi ne valorise-t-elle pas différentes sensibilités et diverses formes d'intelligences ?

Ce n'est pas qu'un problème de mise en œuvre, c'est aussi un problème de corporatisme et d'amour. De corporatisme, parce que le système français est, je crois, gangrené par les grandes écoles (les écoles de commerce et surtout d'ingénieurs). Il est évidemment légitime de former des ingénieurs, cela ne fait aucun doute ! Hélas, ce n'est pas de cela qu'il est question : c'est de la formation des élites en général qui, dans leur immense majorité, proviennent de ce moule très formaté. Je suis moi-même ingénieur de formation. De quoi s'agit-il ? Quelle est donc cette éducation « haut-de-gamme » ? Essentiellement deux années de travail acharné (les classes préparatoires) pendant lesquelles il est presque impossible de penser – il ne s'agit que d'acquérir des automatismes –, suivies de trois années d'école durant lesquelles la plupart des étudiants s'intéressent principalement aux soirées, si possibles décadentes, et autres « clubs » d'équitation, de bridge ou d'œnologie. L'image, j'en conviens, est caricaturale. Mais elle n'est pas fondamentalement fausse. Aujourd'hui, pour tenter de favoriser l'accession aux postes à responsabilité de certaines minorités, on fait entrer quelques élèves « des quartiers » dans les grandes classes préparatoires parisiennes. C'est une mesure ridicule. La solution est simple, évidente, et connue : il suffirait d'intégrer les formations d'ingénieur aux universités. Universités qui sont, effectivement, des lieux de diversité et de mixité. Universités dont les laboratoires de recherches sont souvent extrêmement prestigieux et reconnus (les grandes universités françaises sont sans aucun doute bien mieux connues dans le monde académique international que l'École Polytechnique ou l'École Centrale). Universités dont les enseignants sont presque tous également des chercheurs de haut niveau. Mais universités qui sont très paradoxalement déconseillées à nombre d'excellents étudiants – auxquels elles offriraient pourtant une formation intellectuelle digne de ce nom – à cause de cet ubuesque système des grandes écoles. Pourquoi perdure-t-il ? Alors même qu'il

est une singularité française qui étonne le monde entier. Essentiellement, je pense, par corporatisme. Par cette étrange et inquiétante propension humaine à souhaiter reproduire le système dont nous sommes le produit...

Mais je crois que c'est aussi un problème d'affection. D'affection envers les étudiants et les élèves. Combien de fois ai-je entendu, en réunion pédagogique, des collègues se plaindre de la nullité d'étudiants incapables d'obtenir la moyenne à un examen pourtant trivial... Et je n'ai jamais pu m'empêcher de penser que la plupart d'entre nous, et moi le premier, n'aurions certainement pas, sans réentraînement, la moyenne à cet examen si trivial... A contrario, combien de fois dans ma vie ai-je eu droit à un compliment quand un professeur de collège ou de lycée rendait les copies ? Jamais je crois. Même quand mon devoir était très bon : ce sont les imperfections et incomplétudes qui sont soulignées et exprimées. Combien de fois avons-nous entendu un enseignant nous inviter à oser remettre en cause son enseignement, à questionner la question, à inventer de nouveaux rapports au matériau pédagogique ? En ce qui me concerne, cela ne m'est pas arrivé. Quand on ne bénéficie pas d'un soutien familial très privilégié ou d'une volonté de fer, il est difficile de s'épanouir à l'école. Le mode d'intelligence qui y est enseigné et privilégié (souvent au détriment de la sensibilité) est très spécifique et ne recouvre certainement pas l'ensemble des capacités cognitives valorisables. Peut-être devrions-nous apprendre à aimer les élèves et étudiants dans leur véritable diversité de projets et de désirs plutôt que de tenter de les fondre à tout prix dans le moule de nos valeurs d'enseignants. C'est, en tout cas, ma profonde conviction.

Il y a peu, les étudiants avaient organisé une fête musicale à l'Université Pierre Mendès France où je donne un petit cours d'épistémologie. On pouvait entendre des groupes disséminés ici et là. La multiplicité et la qualité des interprétations étaient remarquables. Ils jouaient, dehors, devant les magnifiques montagnes grenobloises encore enneigées. Le printemps faisait fleurir quelques campanules dans les allées et je remarquais une magnifique abeille charpentière qui s'affairait à entrer dans le tronc d'un vieux frêne. Après avoir un peu profité du spectacle, je me rendis dans l'amphithéâtre pour donner mon cours et, à ma très grande surprise, je constatais qu'il était plein. J'en suis encore stupéfait ! Ils étaient venus assister à un enseignement de philosophie des sciences alors que tant de sollicitations plus délicieuses les unes que les autres appelaient à l'extérieur. Au fond de moi, je ne suis pas certain d'être vraiment heureux qu'ils aient fait ce choix pourtant flatteur. Le monde est souvent plus beau hors des salles de classe. Mais il m'a fortement impressionné. Comme, d'ailleurs, la grande majorité des étudiants que j'ai eu la chance de côtoyer depuis

que je suis enseignant-chercheur : beaucoup sont devenus mes amis et cette capacité à « penser hors de l'ordre », qu'ils m'ont souvent enseigné, m'a été infiniment précieuse. Pour être tout à fait honnête, et bien que je n'ose pas toujours le leur dire avec suffisamment d'emphase et de franchise, j'ai souvent la plus grande admiration pour mes étudiants. Ils m'ont tant appris. J'espère que parfois certains suivent secrètement mes conseils et choisissent, au détriment de leurs devoirs et de leur TD, d'écouter une fugue de Gibbons, de s'éblouir de la lumière noire d'un Soulages, de lire Artaud ou Bataille ou de s'enivrer de l'odeur d'humus d'une forêt humide avec l'âme enchantée et intransigeante d'un enfant nietzschéen¹². À moins, ce qui serait bien mieux encore, qu'ils ne suivent aucun conseil et inventent une voie inexplorée.

Généraliser la relativité

Aussi étonnante soit-elle quand on la découvre, la relativité restreinte n'est pas, loin s'en faut, le point culminant de la révolution einsteinienne. D'un point de vue mathématique, elle est même assez pauvre : on troque un groupe (celui de Galilée) pour un autre (celui de Lorentz). Einstein est allé beaucoup plus loin. L'histoire commence par une remarque simple : tous les corps se meuvent de la même façon dans le champ gravitationnel. Une pierre lourde et une pierre légère tombent de la même manière. Si on les lâche en même temps, elles touchent le sol en même temps. Comment est-ce possible ? Dans la vision newtonienne, c'est un peu miraculeux : la pierre plus lourde est plus difficile à mettre en mouvement (c'est l'inertie) mais cet effet est exactement compensé par le fait qu'elle subit une force plus grande (c'est la pesanteur). Einstein comprend que cette incroyable coïncidence révèle en fait quelque chose de plus profond : si tous les corps, quelles que soient leurs masses, leurs compositions, leurs caractéristiques, évoluent de la même manière dans un champ de gravité c'est sans doute que celui-ci est bien plus qu'une force mais constitue, en fait, une caractéristique de l'espace lui-même.

Tous les corps tombant donc de la même façon, il est possible de décrire la situation comme s'il n'y avait plus de pesanteur mais plutôt un déplacement d'ensemble du référentiel. Autrement dit : si on ferme les volets, il n'y a aucun moyen de savoir si notre crayon tombe sur la table parce que la Terre, située sous notre maison, l'attire ou bien si nous sommes dans l'espace, sans force gravitationnelle, mais qu'un moteur de fusée fait accélérer notre demeure vers le haut. Ces deux situations sont physiquement indiscernables. C'est ce que l'on nomme le principe d'équivalence. Là encore, cet énoncé d'apparence anodine est en fait très lourd de conséquences. Il conduit à l'une des théories

les plus élégantes et les plus révolutionnaires de toute l'histoire de la pensée. Le référentiel équivalent au champ gravitationnel est en accélération et la transformation vers celui-ci – supplantant donc la gravité – engendre une conséquence drastique : elle impose une modification de la géométrie ! Ce que l'on a appris à l'école, la circonférence du cercle égale à 2π fois son rayon, la somme des angles d'un triangle égale à 180 degrés, la surface du disque égale à π fois le carré du rayon... tout cela devient faux en présence de gravitation. La géométrie du monde est plus complexe. Ce n'est pas juste un nouveau phénomène qui survient : c'est la structure dans laquelle se déploient les processus, la matière mathématique, qui se trouve elle-même bouleversée.

Mais il y a plus important encore : le référentiel équivalent n'est pas accéléré de la même façon en deux lieux différents (puisque le champ dépend de la position : il décroît comme l'inverse du carré de la distance autour d'une masse source). Il s'ensuit que la géométrie change à mesure que l'on se déplace ! La trame de l'espace réel est non seulement plus complexe que la géométrie euclidienne apprise au collège et au lycée mais, de plus, elle évolue d'un endroit à un autre et, en général, d'un instant à un autre. Voilà la grande découverte d'Einstein : l'espace-temps est devenu *dynamique*. Il n'est plus ce dans quoi se déploient les phénomènes, il est lui-même un phénomène. Un phénomène en interaction avec d'autres. Le cadre, la géométrie du monde, devient un objet complexe et variable, soumis à des lois d'évolution comme tous les autres processus physiques. Cette immense révolution est aussi une simplification : la physique ne repose plus, comme on le pensait, sur des champs et des particules se mouvant dans un espace-temps donné, mais uniquement sur des champs ! L'espace-temps est devenu un champ comme les autres. La distinction entre contenu et contenant s'effondre. Les objets distordent l'espace-temps et, en retour, cet espace-temps courbé induit les déplacements des corps. Chez Newton, la Lune tourne autour de la Terre parce que la force de cette dernière l'attire. Chez Einstein, La Lune avance en ligne droite, sans subir aucune force, mais dans l'espace-temps courbé par la gravitation terrestre.

En cosmologie...

La relativité générale est une théorie simple du point de vue conceptuel. C'est, en quelque sorte, un retour à la vision platonicienne de la physique : on troque une force – c'est-à-dire une entité complexe, comme Newton lui-même en convenait – pour un effet géométrique. La question essentielle consiste donc à trouver la géométrie créée par une masse donnée, par exemple une étoile ou une galaxie. C'est

exactement ce que permettent de déterminer les équations d'Einstein ! Hélas, en dépit de la simplicité fondamentale de la théorie, ces équations sont extrêmement difficiles à résoudre. Il n'y a que très peu de cas où on sait le faire explicitement et l'un de ceux-ci est justement la description de l'Univers lui-même. Cela peut sembler étrange mais il n'est en fait pas si rare qu'un système global soit plus simple que chacune de ses parties prises isolément. Pensons par exemple à l'ensemble des nombres entiers. Un programme permettant de générer tous les nombres ne prend que quelques cases d'espace mémoire sur un ordinateur. A contrario, un nombre pris au hasard a toutes les chances d'être immense donc de requérir un très grand espace mémoire ! De même, l'Univers lui-même, vu à très grande échelle, est beaucoup plus simple qu'un puceron qui s'y meut. Le cosmos est donc un système que l'on sait, en fait, très bien décrire.

L'application des lois de la relativité générale à l'Univers conduit à un résultat remarquable : il ne peut pas être statique ! Il *doit* être en expansion (ou en contraction). L'observation si surprenante de ces galaxies qui s'éloignent les unes des autres trouve donc maintenant une explication simple et claire grâce aux équations d'Einstein : il ne s'agit pas d'un déplacement des corps céleste dans l'espace mais d'une dilatation de l'espace lui-même. Tout est là : l'expansion de l'Univers n'est pas un mouvement des objets mais un « agrandissement » de l'espace dans lequel ils se trouvent ! Un peu comme si, dans cette partie d'échecs cosmique, la taille des cases augmentait avec le temps, induisant un éloignement des pièces, quand bien même celles-ci ne seraient pas déplacées sur le plateau de jeu.

Les effets de courbure en relativité peuvent induire des conséquences intuitivement étranges. Il est, par exemple, impossible d'imaginer dans l'espace usuel une zone qui soit de taille finie mais néanmoins dépourvue de frontière. Il en va tout autrement dès que la courbure s'invite dans la partie. Cela se voit mieux à deux dimensions. Pensons à une feuille de papier, posée à plat. Incontestablement, si elle est de taille finie, elle possède une frontière constituée par le bord de la feuille. Mais pensons maintenant à la surface d'un ballon. Il a manifestement une taille finie (par exemple une centaine de centimètres carrés) pourtant, il n'a pas de frontière : si vous êtes une fourmi marchant sur le ballon, vous ne rencontrez jamais aucun bord ! Vous n'arrivez jamais au bout du ballon. De même (et c'est alors presque impossible de se le représenter puisqu'on ajoute une dimension) l'Univers pourrait être de taille finie bien que dépourvu de frontière. C'est une manière de répondre à l'argument de Lucrèce au *De Natura Rerum*, sublime poème philosophique et physique¹³. Celui-ci posait que l'Univers devait être infini sans quoi il existerait un bord au-delà duquel se trouverait « quelque chose » qui, par définition,

devrait faire partie de l'Univers. Les espaces courbés de la physique einsteinienne ouvrent d'autres portes...

Relativité et relativisme

La relativité, au sens scientifique, n'est évidemment pas le relativisme, au sens philosophique. Le fait est pourtant qu'elle dessine effectivement un monde « relationnel » où les choses ne sont plus ici et là de manière absolue mais, plutôt, les unes par rapport aux autres, les unes relativement aux autres. Le monde de la relativité est entièrement dynamique. Il n'y a plus de structure fixe sous-jacente, pas même l'espace et le temps. De ce point de vue, elle s'approche effectivement d'un certain relativisme.

Je suis très étonné par le double procès fait, à mon sens injustement, au relativisme. D'une part, la plupart des philosophes, des scientifiques, des théologiens, des historiens, invitent avec insistance à s'extraire du « relativisme ambiant »¹⁴. Il faudrait, dit-on, sauver notre époque de sa dangereuse dérive relativiste. Mon analyse est diamétralement opposée. Il me semble, tout à l'inverse, que notre temps est extraordinairement normatif. Que le bien, le beau, le vrai, le correct, le juste, l'acceptable, le souhaitable, le décent, le signifiant... y sont considérés comme connus ou allant d'eux-mêmes. Nos valeurs, nos critères, nos idéaux sont, par la force des choses, implicitement considérés comme les seuls possibles ou méritoires. L'auto-interrogation sur la légitimité des choix opérés ne m'apparaît certainement pas comme une caractéristique de l'époque contemporaine ! Le doute et la remise en cause de nos hiérarchies sont tout au contraire me semble-t-il, bien peu à l'ordre de jour... Mais, d'autre part, et plus gravement, je crois que la critique essentielle adressée au relativisme est un contresens total. Il est usuellement assimilé à un nihilisme : si tout se vaut, à quoi bon se battre pour des idées ou inventer de nouveaux horizons ? Aucun relativisme sensé (de Protagoras à Derrida, de Nietzsche à Foucault, de Montaigne à Rorty, de James au second Wittgenstein¹⁵) n'a évidemment défendu une telle posture. Le relativisme souligne que nos décisions, choix, engagements sont relatifs à des circonstances culturelles, historiques, sociétales et personnelles. Il ne nie d'aucune manière la nécessité de faire des choix et n'invite à aucune forme de laxisme. Tout à l'inverse, il demande de prendre ses responsabilités et d'assumer ses positionnements éthiques, esthétiques et aléthiques (c'est-à-dire concernant la vérité) comme construits et devant donc être défendus.

Le relativisme est une des grandes phobies de notre temps. Il inquiète. Il angoisse. Il constitue pourtant l'archétype d'un constructivisme : considéré sérieusement, il invite à admettre la fragilité de nos

convictions et nous oblige donc à les soutenir avec d'autant plus d'opiniâtreté. Se bat-on davantage pour sauver de la marée montante une petite dune de sable naturelle ou un château savamment construit tout au long de la journée ? Loin de légitimer les propositions immondes et les pratiques scandaleuses qui, on le sait, sont toujours trop nombreuses, il exige justement raison et responsabilité. Il demande de se positionner en analysant non seulement les choix mais aussi les contextes qui les permettent et les engendrent. Dans une correspondance privée, le grand historien Paul Veyne¹⁶, professeur au Collège de France et spécialiste de la Rome antique, me confiait la défiance qui lui est témoignée lorsqu'il fait part de cette posture, surtout en ce qui concerne la science. Le terme même de « relativisme » est d'ailleurs presque interdit : son ami le philosophe Michel Foucault, utilisait plus volontiers « scepticisme », mon ami le philosophe Jean-Luc Nancy¹⁷ réfère au « perspectivisme ». Quant à Bruno Latour, le sociologue et anthropologue des sciences (souvent catalogué comme un des rares relativistes de notre temps), il m'avouait se considérer comme « relationniste ». Étrange exutoire.

La physique d'Einstein n'impose d'aucune façon de recourir au relativisme philosophique. Mais elle est un excellent déclencheur ou prétexte pour, à mon avis, prendre enfin conscience de la contingence de nos postures. Comprendre et accepter qu'une conviction ait pu être autre, qu'elle n'est pas « naturellement juste » mais qu'elle résulte de l'élaboration d'un système (ou, pour les nietzschéens au rang desquels j'espère me trouver, de la déconstruction d'un système) n'invite évidemment pas à y renoncer. Tout au contraire, cela l'arrime dans une matrice plus complexe et plus exigeante puisque les conditions de production du savoir y sont également scrutées. Tout à l'opposé d'un nihilisme ou d'un laxisme, le relativisme est une humilité engagée. Je m'étonne que beaucoup de scientifiques considèrent généralement cette posture comme antagoniste à leur démarche.

Les trous noirs : des laboratoires d'étude pour l'Univers

« Paradoxalement, c'est peut-être du côté des sciences dures qu'il convient d'espérer le retournement le plus spectaculaire à l'égard des procès de subjectivation. »

Felix Guattari, Les Trois Écologies.

Mythe ou réalité ?

Les trous noirs sont-ils un mythe ou des objets réels ? C'est une question apparemment légitime. À la condition de demeurer, pourtant, circonspect sur cette disjonction qui ne va pas d'elle-même. Nos connaissances d'aujourd'hui seront-elles les mythes de demain ? Notre science contemporaine est-elle en continuité ou en rupture avec les grands mythes fondateurs ? Le cosmologiste est-il l'héritier de l'aède – du poète – de la Grèce antique ou son ennemi ? Écrivons-nous, à l'instar du splendide Hésiode, une nouvelle Théogonie¹⁸ ou entendons-nous rayer celle-ci de la liste des récits vraisemblables (pour reprendre les mots de Platon au Timée, l'une des plus saisissantes cosmologies de l'histoire¹⁹) ? Ce sont des questions bien trop complexes pour y répondre ici. Elles convoquent toute une archéologie des civilisations, de leurs rapports aux croyances et de leurs modes d'élaboration d'une parole commune. Mais il est salutaire d'avoir à l'esprit que la dichotomie mythe/réalité est généralement, au mieux, caricaturale, au pire, inepte.

Il en va d'ailleurs de même de la définition de la science. Beaucoup de chercheurs aiment le critère de Karl Popper parce qu'il est simple et séduisant : est scientifique toute proposition que l'on peut mettre en défaut²⁰. Par exemple, l'énoncé « Dieu existe » n'est pas scientifique parce qu'il est impossible de prouver qu'il est faux. Au contraire, la proposition « tous les cygnes sont blancs » est scientifique parce qu'il suffirait de trouver un seul cygne noir pour la réfuter. Je pense que cette vision est tout à fait erronée. En observant de près l'histoire des sciences, il apparaît que les choses n'ont jamais fonctionné ainsi. Des incohérences ont été trouvées dans la théorie newtonienne bien avant

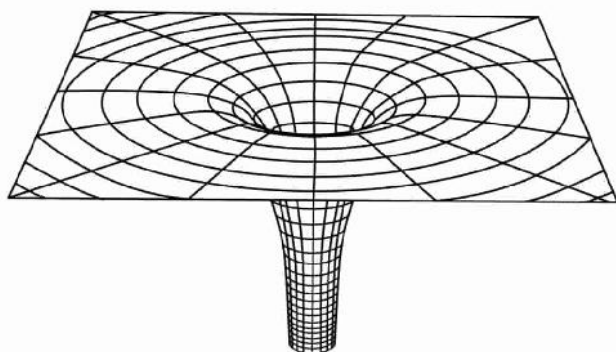
la découverte de la relativité générale sans pourtant conduire les scientifiques à y renoncer. D'un certain point de vue, toutes les théories connues ont des difficultés et seraient, en ce sens, déjà réfutées. Je pense que les choses sont infiniment plus subtiles que cela. Bien évidemment, la démarche scientifique présente des spécificités. Mais elles ne peuvent certainement pas être identifiées par un principe simple construisant une ligne de démarcation non équivoque entre science et non-science. Les frontières sont rarement souhaitables – sauf pour qui veut en exclure les indésirables – et cette vérité politique peut, je crois, s'exporter dans le champ de la pensée et de la connaissance. Paradoxalement, les philosophes qui n'ont pas fait de la science leur thème spécifique d'étude me semblent avoir, à son propos, suggéré des énoncés nettement plus pertinents que la plupart des épistémologues. Pensons, par exemple, à Gilles Deleuze. Bien loin de la physique, il s'est avant tout intéressé à l'invention de concepts. Pourtant, au détour d'une pensée de ce qu'il nomme la « déterritorialisation », en marge du dess(e)in d'un plan d'immanence, il propose une lecture visionnaire et presque révolutionnaire de la science. Il comprend par exemple que la manière scientifique d'affronter le chaos n'a rien à voir avec la prétendue quête de l'unité. Deleuze réinvente la science, au même titre que l'art ou la philosophie, comme une chaoïde²¹. Il la pense en terme de création de fonction, en terme de « ralentie » dans le magma indifférencié des variations infinies primitives.

Toujours est-il que si l'on choisit d'appeler réel ce qui est effectivement appréhendé par la science de notre temps, non seulement comme possible mais aussi comme effectif, les trous noirs le sont bel et bien ! Pendant longtemps ils ne furent que des solutions étranges d'équations complexes. Des possibles non instanciés. Aujourd'hui, les observations ne laissent plus guère de doute : les trous noirs sont des objets plutôt banals du bestiaire de l'astrophysicien. Il y en a d'immenses, au cœur des galaxies : celui qui siège au centre de la Voie Lactée pèse trois millions de fois la masse du Soleil. Et beaucoup d'autres, très nombreux, plus petits, résultant de l'explosion d'étoiles plus massives.

Étrange horizon

Les trous noirs sont des zones où la gravitation est si intense que même la lumière ne peut s'en échapper. Leur surface, qu'on nomme « horizon », n'est pas une cloison matérielle mais une simple limite mathématique : une fois celle-ci franchie, plus aucun retour vers l'extérieur n'est envisageable. On peut entrer sans dommage dans un trou noir, rien de particulier n'advient au passage de l'horizon. Mais il est impossible de s'en extraire. Cette vision est correcte mais

insuffisante. Seule la relativité générale permet de vraiment comprendre les trous noirs. Par chance, comme pour l'Univers dans son ensemble, c'est un rare cas où l'on sait trouver la solution exacte des équations d'Einstein.



L'objet est en réalité sphérique et cet « entonnoir » témoigne en fait de l'étirement drastique de l'espace-temps au niveau de l'horizon du trou noir.

*Représentation de la distorsion de l'espace-temps induite
par la présence d'un trou noir*

Une fois ces équations résolues, on découvre quelle est la géométrie de l'espace au voisinage d'un trou noir. Elle diffère grandement de celle qui nous est familière. Si, par exemple, on comparait la véritable circonférence du Soleil à 2π fois son rayon, on trouverait que l'écart entre les deux n'est, à cause de la courbure de l'espace-temps, que de 1 millimètre environ. Ce qui est extrêmement important au niveau conceptuel mais de peu de conséquences pratiques. Pour un trou noir, au contraire, la différence deviendrait... infinie ! L'espace y est considérablement distordu. Imaginons qu'on lâche une pierre et qu'on la laisse tomber vers un trou noir. Quelle serait sa vitesse lorsqu'elle atteint l'horizon, c'est-à-dire la surface, du trou ? Les équations d'Einstein montrent que cette vitesse serait la plus grande possible, c'est-à-dire celle de la lumière, pour un observateur situé à proximité immédiate du trou noir. En revanche, pour un observateur lointain étudiant la même scène, ces mêmes équations montrent qu'elle serait justement la plus petite possible : la pierre s'immobiliserait lentement à la surface. Quelle est donc la réponse correcte ? Elles le sont toutes deux. Là encore, tout est relatif : bien qu'apparemment paradoxale cette description est extrêmement cohérente. Il n'existe pas une unique

manière de décrire le monde environnant. La réponse dépend de la façon d'interroger.

L'espace-temps est tellement courbé par la présence d'un trou noir que l'image du ciel, telle qu'on pourrait l'observer à proximité de celui-ci, serait très différente de ce qui nous est familier. Les rayons lumineux étant considérablement défléchis, chaque étoile apparaîtrait plusieurs fois et même, en fait, une infinité de fois. Ces images « fantômes » correspondent aux différents chemins que peut suivre la lumière pour se propager de la source jusqu'à nos yeux. Ce chapelet d'artefacts n'a aucun équivalent en physique non-relativiste. Astres paroxystiques, les trous noirs exhibent la complexité de l'espace façonné, par la matière, jusqu'à l'effondrement.

Les trous noirs laboratoires

Comme beaucoup de cosmologistes, j'ai commencé par étudier la physique des trous noirs. Ils sont, en quelque sorte, des « laboratoires » idéaux pour sonder l'Univers lui-même. Je m'y suis intéressé à la fois d'un point de vue observationnel, avec l'émission de photons gamma par les trous noirs supermassifs des galaxies actives, et d'un point de vue théorique. Dans le premier cas, ce sont pour l'essentiel des processus astrophysiques qui sont en jeu et l'attention est alors portée vers les méthodes expérimentales. Comment voir toujours mieux et toujours plus loin ces phares de l'Univers que sont les quasars ? L'observation revêt encore pour moi une dimension presque magique parce qu'elle est sans doute le geste qui permet le plus aisément de se laisser surprendre. Les astronomes sont si souvent étonnés par leurs propres mesures... Seule l'observation menée durant de longues nuits blanches offre, je crois, cette exaltation particulière où le chercheur se sent, à tort ou à raison, absolument aventurier. Presque démuné face à ce qui peut surgir des prises de données. Rapidement pourtant, j'ai désiré me consacrer davantage à l'investigation théorique des trous noirs. C'est à eux qu'a été consacré mon diplôme d'habilitation à diriger des recherches. Poussant la relativité à ses limites, ils sont peut-être plus fascinants encore quand on les appréhende avec des équations et des tenseurs. Certains mystères se dévoilent davantage avec un peu de mathématiques qu'avec tous les télescopes du monde...

Avec mon ancien doctorant et maintenant collègue, Julien Grain, nous avons investi beaucoup d'énergie pour comprendre comment les particules élémentaires interagissent avec les petits trous noirs. Ce sont des questions importantes parce que de multiples difficultés surgissent, nécessitant l'invention de nouvelles solutions. En grande partie grâce à la dextérité remarquable et au courage intellectuel de Julien, nous avons obtenu des solutions intéressantes pour divers

types d'espace-temps. Ces résultats ont intéressé la communauté et m'ont valu d'être invité, en tant que visiteur, dans les deux laboratoires les plus fermés et prestigieux du monde : l'Institut des Hautes Études scientifiques (IHES) de Bures sur Yvette, en France, et l'Institute for Advanced Study (IAS) de Princeton, aux États-Unis. Ces temples du savoir et du prestige académique, fréquentés exclusivement par les tout meilleurs chercheurs en mathématiques et physique théorique (ainsi que quelques autres disciplines à l'IAS), m'ont laissé une curieuse impression. Assurément, ce sont des lieux d'excellence. Mais ces tours d'ivoire où tout est pensé pour qu'aucune contrainte n'entrave la quiétude des scientifiques me laissent un peu perplexe. C'est souvent dans la confrontation avec les difficultés et dans l'interaction avec les étudiants que les idées germent. Là, tout est lisse et épuré. Beauté hypostasiée et donc atrophiée. Je crois qu'une certaine rugosité, un désordre latent, un inconfort lancinant, doivent souvent jalonner les parcours créatifs. C'est vrai, le plus grand physicien du XX^e siècle (Albert Einstein) et le plus grand mathématicien du XX^e siècle (Kurt Gödel²²), entre beaucoup d'autres, y travaillèrent. Mais ils n'intégrèrent ces institutions qu'après leurs découvertes majeures... Lorsque le travail était, en somme, déjà fait. Peut-être y a-t-il ici chez moi quelque chose d'un militantisme politique refoulé ou d'une culpabilité inavouée mais je me sens finalement plus à mon aise dans les murs souvent délabrés des universités françaises que devant l'arrogance ostentatoire de l'architecture des universités de Princeton ou de Stanford, que je fréquente pourtant régulièrement. L'intelligence et la création n'ont pas besoin de luxe. Elles ont besoin de liberté. Les moyens dévolus à la recherche me semblent mieux employés lorsqu'ils sont utilisés pour les expériences elles-mêmes, ou pour des allocations destinées aux étudiants les moins aisés, que lorsqu'ils sont investis dans ces signes extérieurs de puissance...

À l'intérieur

Dans les trous noirs, les choses deviennent plus radicalement étonnantes encore. En un sens précis, les changements de signe qui interviennent dans l'équation décrivant la géométrie peuvent s'interpréter comme un échange de l'espace et du temps. Au-delà de l'horizon, à l'intérieur du trou, le temps devient espace et l'espace devient temps. Ces deux concepts si habituellement hétérogènes se troquent l'un pour l'autre. La singularité centrale, cette zone au cœur du trou noir où toute la matière se trouve concentrée, se situe d'ailleurs moins en un lieu qu'à un instant. Le temps lui-même cesse, en quelque sorte, de s'y écouler. Elle est une déchirure temporelle.

C'est pourquoi elle marque inéluctablement une mort certaine pour le voyageur imprudent qui se serait aventuré à l'intérieur d'un trou noir. Mais notons bien que cette mort ne survient pas au moment de l'entrée dans l'astre. Elle peut survenir bien avant si le trou noir est de faible masse : les effets de marée – de même nature que ceux qu'engendre la gravitation lunaire sur la Terre – sont si grands que l'astronaute serait démembré avant même d'atteindre la surface du trou noir. Autrement dit, le champ de gravité varierait tellement vite que les parties du corps plus proches du trou noir (par exemple les pieds) seraient beaucoup plus attirées que les parties plus lointaines (par exemple la tête), conduisant à un écartèlement fort désagréable du voyageur spatial... Au contraire, si le trou noir est très massif, ce phénomène devient négligeable et il est alors possible d'explorer l'intérieur du trou. Mais mieux vaut se tenir tranquille : toute tentative pour ralentir la chute sur la singularité – par exemple l'allumage d'un petit moteur de fusée dirigée vers celle-ci pour pousser vers l'extérieur – ne peut que précipiter les choses ! Le spectacle serait assez grandiose : un ciel noir du côté du trou, un ciel devenant rapidement très sombre du côté opposé, et un fin anneau de lumière entourant l'astronaute et séparant ces deux zones presque indiscernables. Il n'est pas étonnant que les trous noirs fascinent les cinéastes et c'est d'ailleurs avec un plaisir étonné et assez naïf que je prends un peu de mon temps pour collaborer en ce moment avec la grande réalisatrice Claire Denis – que j'ai aimée et admirée dès *Paris Texas* et *Les Ailes du Désir* où elle assista Wim Wenders, puis avec son formidable *Chocolat*.

Les trous noirs sont des objets essentiellement bien compris. Les effets relativistes y sont considérables et ils constituent donc des lieux idéaux pour mener des expériences de pensée permettant de mieux comprendre – et parfois même de contraindre – les théories. De nombreuses avancées et découvertes ont été possibles grâce à ces expériences « virtuelles » où le physicien théoricien se demande : que se passerait-il si... ? sans même avoir besoin de le faire effectivement. Une telle expérience consiste par exemple à s'interroger sur le statut d'une bouteille de gaz jetée dans un trou noir. Le gaz est un ensemble désordonné de molécules. En physique, on quantifie ce désordre – c'est-à-dire cette information considérable (les positions et vitesses de toutes les molécules) qui est ignorée quand on regarde à grande échelle – par le concept d'entropie. Si le gaz possède donc une grande entropie et que le trou noir n'en possède pas, cela signifie qu'en jetant la bouteille emplie de gaz dans un trou noir dont elle ne pourra évidemment jamais être extraite, l'entropie de l'Univers aura diminué. Or, la science de la chaleur, ce qu'on nomme la thermodynamique, nous apprend que l'entropie ne peut pas diminuer. Il faut donc supposer qu'en jetant la bouteille dans le trou noir, on fait augmenter

l'entropie de ce dernier ! Mais puisque l'entropie rend compte du « désordre », cela signifie que la simplicité des trous noirs – qui peut pourtant être démontrée en relativité générale – n'est qu'apparente et qu'ils sont en fait des objets très complexes. Sans aucun doute même, les plus complexes de l'Univers... La mystérieuse entropie des trous noirs est ainsi un défi majeur lancé à la physique théorique.

Au-delà de la relativité ?

Les trous noirs poussent la relativité générale dans ses retranchements. En un sens, ils en exhibent la grande cohérence en mettant en évidence des effets qui seraient totalement incompréhensibles avec la physique newtonienne. Mais ils en soulignent aussi certaines limites et invitent à considérer des théories « au-delà » de la relativité d'Einstein. Qu'est-ce exactement que la relativité générale au sens d'Einstein ? Il est intéressant de constater qu'il n'y a pas unanimité de vue concernant cette question chez les spécialistes. Pour certains, la relativité est définie par les équations d'Einstein. Ou, pour le dire de façon légèrement plus technique, par un certain Lagrangien (une fonction mathématique qui contient l'information sur le système) – dit d'Einstein-Hilbert – qui leur est équivalent. Pour ces chercheurs, toute autre expression mathématique est radicalement différente de la théorie einsteinienne. C'est évidemment un point de vue défendable. Mais pour d'autres physiciens, dans les rangs desquels je me range, l'essentiel n'est pas là. Le cœur de la théorie d'Einstein, c'est l'invariance de fond : le fait qu'il n'existe plus aucune structure « figée » dans l'Univers, le fait que tout est dynamique et en interaction, le fait que l'espace-temps est un champ comme un autre régi par des lois d'évolution. Cette idée un peu vague admet une traduction mathématique très rigoureuse qu'on nomme l'invariance par difféomorphismes. Il devient alors possible d'étudier des théories qui respectent cette invariance fondamentale, disons donc l'esprit de la relativité générale, mais sont régies par des équations d'évolution un peu différentes.

J'ai passé un certain temps à étudier ces modèles, dits de gravitation étendue, en particulier avec mon ami Stanislav Alexeyev, de l'Université d'État de Moscou. Nous nous sommes concentrés sur des modèles où le lagrangien était un peu plus compliqué que celui d'Einstein-Hilbert. Ils ne contredisent pas la relativité, ils la complètent. Non pour le (seul) plaisir de manier des mathématiques raffinées mais parce que cela présente des avantages certains en cosmologie et en physique des trous noirs. De plus, quelques théories modernes de physique des particules plaident pour un tel choix. Spécifiquement, nous avons montré que certaines instabilités connues

en physique des trous noirs pouvaient être ainsi résolues de façon naturelle. Des grandeurs qui tendent usuellement vers l'infini admettent dans ce contexte des valeurs plus raisonnables. Il faut se départir de l'idée trompeuse, véhiculée par un enseignement dogmatique des sciences, suivant laquelle nos théories peuvent se déduire de façon non équivoque d'un petit nombre de principes. Il existe d'autres modèles gravitationnels, respectant l'invariance de fond, légitimes à tout point de vue, et différents pourtant de celui d'Einstein-Hilbert. Ils présentent des avantages et des inconvénients. Le tri est loin d'être achevé.

Ces études furent aussi pour moi, lors de visites à l'Institut Sternberg de Moscou, l'occasion de discussions passionnantes avec Alexeï Starobinsky, l'inventeur de la théorie de l'inflation cosmologique qui est aujourd'hui l'un des piliers de notre modèle standard de l'Univers. Après de nombreux voyages dans ces terres orientales, l'âme russe conserve à mes yeux quelque chose d'absolument impénétrable. Une sorte de « poésie de la douleur » qui m'effraie au premier regard mais qui, je crois, m'attire en réalité bien plus qu'elle ne me repousse. Un petit vent de prince Mychkine et de frères Karamazov souffle encore, parfois, sur la campagne russe²³. Mon dernier déplacement eut lieu à Dubna pour la remise d'un prix de physique théorique que j'avais gagné un peu par hasard je crois. Plus que du très impressionnant laboratoire Bogoliubov – le plus grand centre de physique théorique au monde – je me souviens surtout d'une panne de voiture dans la taïga où la vieille Lada de mon ami Stanislav a rendu l'âme. Pour moi dont les compétences en mécanique sont voisines de la nullité absolue, voir les soupapes du moteur déposées à terre les unes après les autres, la nuit hivernale tombant rapidement, était tout à la fois très excitant et assez angoissant ! Après quelques heures d'attente dans cette fascinante forêt gelée et austère, un vieux Russe bourru mais finalement adorable, à l'automobile apparemment plus piteuse encore que la nôtre, nous a finalement raccompagnés chez nous, à plus de cent kilomètres. Les environs de l'Institut de Recherche Nucléaire de Dubna sont étonnants. Une nature brute, étrange et intense, côtoie d'immenses indicateurs lumineux. À la fin de mon séjour, je me suis résolu à demander à mes hôtes ce que signifiaient ces chiffres géants que je ne comprenais pas : ils ne coïncidaient ni avec la température, ni avec la pression atmosphérique. En riant, ils me répondirent qu'il ne s'agissait que du taux de... radioactivité dans l'air ! Insondable Russie...

Un bain de particules élémentaires

« Définir le front des luttes actuelles c'est composer le visage de demain en choisissant la manière dont nous courberons l'espace-temps afin de voler d'étoiles en étoiles. »

Véronique Bergen, Résistances philosophiques.

Très tôt

La relativité générale décrit remarquablement bien le fait que l'espace-temps est dynamique. Elle permet donc de comprendre l'expansion observée de l'Univers ainsi que la structure des trous noirs. Mais ce qu'énoncent en fait les équations d'Einstein, c'est un lien entre l'évolution de l'espace-temps et son contenu. Pour véritablement prévoir la dynamique du cosmos, le « mouvement » de sa géométrie elle-même, il est donc indispensable de savoir ce qu'il renferme. Une même quantité d'énergie se trouvant sous forme de lumière ou sous forme de matière ne va, par exemple, pas conduire à la même dynamique cosmologique. On sait d'ailleurs aujourd'hui que l'Univers ayant été dominé par différents types de constituants au cours du temps, il a vu sa vitesse de dilatation varier en conséquence. De plus, indépendamment de la question globale de l'évolution de la trame d'espace-temps, il est évidemment légitime de s'interroger sur le contenu de l'Univers primordial, peu après le Big Bang. La question est signifiante et pertinente en elle-même. Cosmologie et physique des particules sont donc étroitement liées. Lorsque l'on considère des époques de plus en plus précoces dans l'histoire cosmique, la température y devient de plus en plus élevée et la situation de plus en plus énigmatique. L'expansion de l'Univers joue comme une sorte de « détente » qui, comme dans un réfrigérateur, fait chuter la température. Mais aux énergies considérables des premiers instants, la matière n'était pas encore agrégée suivant sa forme actuelle. Elle était plutôt disséminée dans un bain de particules élémentaires.

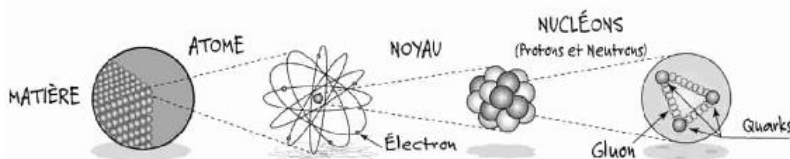
Le jeu est donc à double sens : il faut connaître la physique des particules pour appréhender l'Univers primordial mais, réciproquement, on peut espérer utiliser les premières secondes du cosmos pour mieux comprendre ce qui demeure encore mystérieux en

physique de l'infiniment petit. Ici, microcosme et macrocosme sont en interaction forte. Les physiciens des particules clament souvent que le « modèle standard » des constituants élémentaires fonctionne très bien. Ce n'est pas tout à fait exact et l'une des rares observations montrant son incohérence vient justement de la cosmologie. Dans les tout premiers instants après le Big Bang, on sait que matière et antimatière étaient présentes en abondance et on peut facilement calculer l'intensité des processus d'annihilation qui se produisirent alors. La prédiction du modèle standard est claire : il ne devrait pratiquement rester que de la lumière dans notre Univers. Le simple fait que nous existions, c'est-à-dire que d'importantes quantités de matière aient survécu, montre déjà qu'il doit exister de la physique au-delà du modèle standard, de la « nouvelle » physique ! L'Univers est ici un révélateur de phénomènes microscopiques jusqu'alors inconnus.

Le cosmos constitue finalement le plus extraordinaire laboratoire de physique fondamentale qui soit. Les processus les plus cruciaux que l'on tente de comprendre aujourd'hui ont eu lieu dans les tout premiers instants. Sans doute ont-ils laissé quelques traces ici et là. L'enjeu de la cosmologie est également de tenter de les découvrir pour apprendre du ciel ce qui ne se voit pas sur Terre.

Des symétries

La matière est composée de molécules. Les molécules sont composées d'atomes. Les atomes sont composés de noyaux et d'électrons. Les noyaux sont composés de protons et de neutrons. Les protons et les neutrons sont composés de quarks. Et, dans l'état actuel des connaissances, la structure gigogne s'achève à cette échelle. Cette présentation simple et intuitive ne permet pourtant pas de saisir l'essence de la physique des particules. Celle-ci ne repose pas aujourd'hui sur l'image de petits morceaux composites imbriqués les uns dans les autres. Il faut dépasser cette représentation pour deux raisons essentielles.



Les particules élémentaires du modèle standard

La première tient à ce que la physique classique ne suffit plus à

l'échelle microscopique. Depuis plus d'un siècle, il est apparu évident qu'il fallait recourir à une autre physique : la mécanique quantique. C'est une étrange discipline qui a, au même titre que la relativité, révolutionné la science et conduit à des bouleversements très profonds. D'abord, les particules s'y délocalisent. Elles s'étalent dans l'espace. Non pas au sens d'objets qui seraient de plus en plus grands, mais plutôt au sens d'entités ubiquistes. Un électron, par exemple, peut passer par deux trous distincts en même temps ! C'est ce que montrèrent rapidement les premières expériences de mécanique quantiques : il n'est plus possible de raisonner en termes de trajectoires. Les particules sont simultanément ici et là. Ensuite, la physique quantique montre que beaucoup d'observables dont on pensait qu'elles pouvaient prendre n'importe quelles valeurs sont en réalité discontinues et ne peuvent varier que par petits incréments finis. Enfin, il y devient nécessaire de renoncer au déterminisme de la physique classique au profit d'une vision « aléatoire ». Cette perte de prédictivité quantique n'est pas due à l'incomplétude de notre connaissance ou aux défauts de nos instruments, mais semble être inhérente à la Nature elle-même. En physique newtonienne, c'est-à-dire non quantique, un atome devrait être hautement instable : l'électron, rayonnant de l'énergie, s'effondrerait presque immédiatement sur le noyau. La mécanique quantique permet de stabiliser l'ensemble de l'édifice en interdisant à l'électron de trop s'approcher du cœur de l'atome : les distances possibles sont « quantifiées » et la plus petite n'est pas égale à zéro. Elle joue donc un rôle « vital » dans notre propre existence !

La seconde raison pour aller au-delà de la vision naïve des particules élémentaires tient à l'importance centrale, en physique corpusculaire, des symétries. Une symétrie est une opération qui laisse un système inchangé. Par exemple, une bille de métal est invariante quand on la tourne autour d'un de ses axes : c'est une symétrie de rotation. La relativité restreinte, comme nous l'avons vu, est une théorie fondée sur les symétries : le fait que les lois de la science soient invariantes par déplacement dans le temps et dans l'espace y joue un rôle clef et tout le modèle est construit sur cette symétrie. La physique des particules, plus que tout autre domaine, a tiré les conséquences les plus extrêmes de cette leçon. Elle est entièrement nervurée par cette démarche. Schématiquement, il est par exemple possible de considérer que l'interaction nucléaire faible est construite pour être invariante en tournant dans un espace dont les axes seraient l'électron et le neutrino. Ceci parce que, précisément, elle ne distingue pas l'un de l'autre. L'opération qui consiste à remplacer l'un par l'autre ne change pas la physique associée à cette interaction. C'est la symétrie qui préside à sa formulation mathématique. De même, l'interaction forte est élaborée

pour que son expression demeure invariante lors d'une rotation dans un plan dont les axes seraient le proton et le neutron, puisqu'ils sont précisément indiscernables de son point de vue. Ce qui importe, ce ne sont pas les détails de cette description ici présentée de manière très simpliste, c'est de noter le recours systématique aux symétries comme socle de construction. Il est donc largement abusif de laisser entendre que les quarks sont des petites billes liées par des élastiques au cœur des noyaux atomiques. Ils sont plutôt des représentations irréductibles de groupes de symétrie. Le langage sous-jacent est complexe et fait appel à une mathématique élaborée mais l'idée est simple : il faut déterminer les invariances des systèmes physiques, fût-ce dans des espaces abstraits, et les utiliser comme guide pour élaborer les théories.

En physique des particules, l'idée s'est révélée si fructueuse qu'elle fut poussée plus loin encore. Ces symétries « globales », c'est-à-dire concernant tout l'espace, ont été appliquées de façon locale. Ce pas est extrêmement audacieux ! On comprend bien qu'il est possible de changer l'origine d'un repère (c'est-à-dire d'opérer un déplacement spatial d'ensemble) mais il n'est pas a priori possible de le faire différemment en chaque point : l'origine des longitudes pourrait être à Paris ou Athènes, mais chaque ville ne peut évidemment pas adopter une convention arbitraire. Si donc on s'autorise cette localisation illicite des symétries, il faut introduire un nouvel élément dans le modèle. Un objet qui permette de véhiculer ces choix : un médiateur. Ces médiateurs sont justement ce qu'on nomme les « bosons de jauge ». Ils s'échangent entre particules et témoignent, à l'échelle microscopique, de ce qu'on appelle, à l'échelle macroscopique, une force. La force électromagnétique correspond ainsi à l'échange de photons, la force nucléaire forte à l'échange de gluons, la force nucléaire faible à l'échange de particules W et Z et la force gravitationnelle à l'échange de gravitons. Cette description des interactions comme émission et réception de bosons est profondément ancrée dans la localisation des symétries fondamentales et constitue le principe de jauge.

Les concepts de la physique de l'infiniment petit ne se laissent pas facilement appréhender et, comme beaucoup d'enfants de la région parisienne intéressés par la science, mes premiers contacts avec la physique subatomique ont eu lieu au Palais de la Découverte, temple magique de l'initiation à la pensée scientifique. Sans une once de mathématique, quelques idées pouvaient déjà y être comprises. Mais, bien plus qu'à ces quelques salles délicieusement désuètes animées par des conférenciers souvent extraordinaires, c'est évidemment à mes parents que je dois ma véritable découverte de la pensée critique et créative. À l'exceptionnelle capacité d'émerveillement de ma mère, au

temps et à l'affection intelligente qu'elle m'a donnés sans compter – quels lieux insolites n'avons-nous pas parcourus avec délectation pendant ma petite enfance ? – et à la présence singulièrement vigilante, généreuse et stimulante de mon père. Sans aucun doute, ce halo affectif et intellectuel vaut tous les professeurs et livres du monde.

Et des brisures de symétries

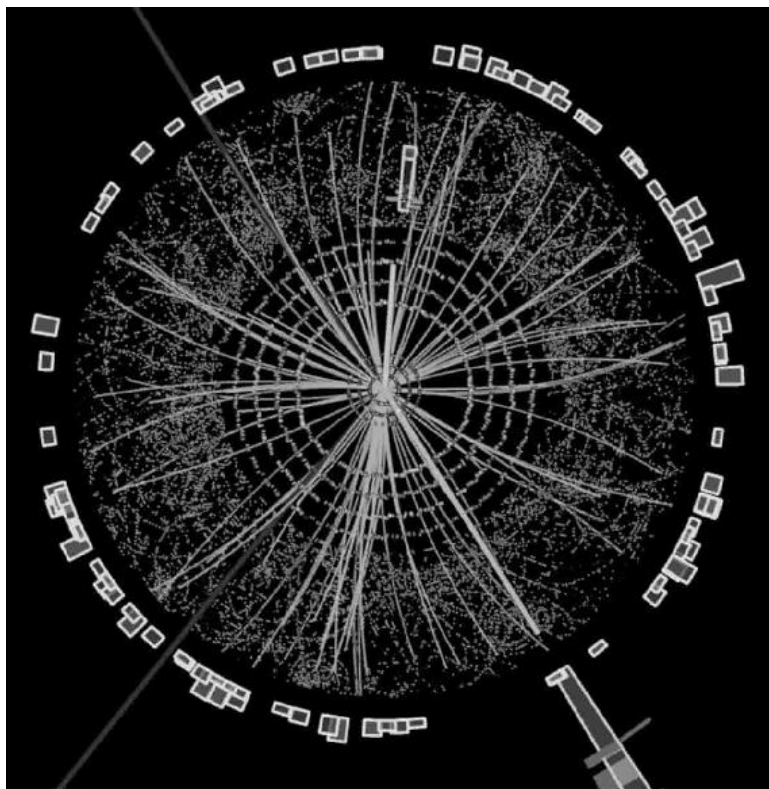
Les symétries jouent donc un rôle essentiel en physique de l'infiniment petit. Elles permettent non seulement de décrire correctement les différentes interactions, en particulier quand on les « localise », mais elles permettent aussi de les unifier. De cette manière, on comprend aujourd'hui que les forces électrique et magnétique peuvent être assemblées grâce au concept d'interaction électromagnétique. Au-delà, cette force électromagnétique peut être unifiée avec la force nucléaire faible pour conduire à l'interaction électrofaible. Cette démarche unificatrice fonctionne. Mais, si le monde est effectivement unifié, comment se fait-il qu'au quotidien les forces nucléaires se distinguent évidemment des forces électromagnétiques ? Heureusement, un feu de cheminée n'engendre pas une explosion atomique ! Il manque en effet un élément à ce puzzle : la brisure spontanée de symétrie.

Pensons à un crayon posé verticalement sur sa pointe. Initialement, tout est invariant par rotation autour de l'axe du crayon : le champ gravitationnel est vers le bas, la réaction de la table est vers le haut et l'objet lui-même, supposé cylindrique, reste identique quand il est tourné sur lui-même. Autrement dit, la situation présente, là encore, une invariance par rotation autour du crayon : aucune direction particulière n'est privilégiée. Mais, si le crayon est lâché, inmanquablement, il va tomber. Même s'il était tenu parfaitement droit, il tomberait parce que l'équilibre est instable. Une infime perturbation (éventuellement d'origine quantique et donc strictement inévitable, même dans le vide) le fera choir. Lorsque le crayon s'immobilisera sur la table, il pointera alors dans une unique direction. Le système ne sera plus du tout invariant par rotation : l'axe de la mine sera, par exemple, orienté Nord-Sud à l'exclusion de toute autre orientation. Le système physique a évolué d'une situation initiale symétrique (aucune direction privilégiée) vers une situation finale asymétrique (une direction spécifique émerge aléatoirement). Les physiciens appellent ce phénomène une brisure spontanée de symétrie.

Il existe de nombreux exemples de telles brisures au quotidien. Un verre d'eau, par exemple, contient d'innombrables molécules. Chacune d'elle se comporte comme un dipôle électrique, c'est-à-dire une sorte de « petite flèche ». Initialement, à cause de la chaleur, ces petites

flèches sont réparties dans tous les sens. En moyenne, il y en a autant dans chaque direction de l'espace et le contenu du verre ne présente donc aucune direction spécifique. Néanmoins, si la température baisse et qu'il gèle, l'eau devient glace et les molécules se figent. Il est alors énergétiquement favorable à l'eau solidifiée que toutes les flèches soient alignées suivant le même axe : une direction spécifique émerge, au hasard, à partir de la configuration initiale dans laquelle elles se valaient toutes. Mais un autre verre, placé à côté, pourra voir ses dipôles se figer suivant une tout autre orientation.

Dans le cadre de la physique des particules élémentaires, le récemment découvert « champ de Higgs » joue, précisément, un rôle central dans le processus de brisure spontanée de symétrie. Il était d'ailleurs émouvant de voir, au CERN, lors de la conférence annonçant la découverte de cette particule, Peter Higgs, vieil homme à l'allure affable et aux manières raffinées, ne pas parvenir à cacher quelques larmes d'émotion. Ce champ est en quelque sorte ce qui permet de comprendre le caractère diversifié et foisonnant de notre monde en dépit de l'unité (c'est-à-dire de la symétrie) qui semble le sous-tendre à un niveau fondamental. Le Higgs permet de rompre la symétrie comme, dans l'exemple du crayon posé sur la pointe, le champ de gravité terrestre l'invitait à tomber. Il est aussi à l'origine des masses parce qu'il confère une sorte de « viscosité » au vide : les particules s'y meuvent plus difficilement, comme on s'y attendrait intuitivement si elles devenaient massives. La particule de Higgs correspond à une excitation collective autonome de ce substrat rendant le vide « gluant ».



*Traces de particules, parmi lesquelles se trouve peut-être un boson de Higgs,
émanant d'une collision dans l'accélérateur
LHC du CERN.*

Ce processus de brisure de symétrie est de la plus haute importance en cosmologie. Au fur et à mesure de l'évolution cosmique, la température de l'Univers a chuté. Différentes brisures se produisirent alors successivement. À partir d'une situation très unifiée et symétrique, les lois de la physique se sont donc structurées selon la forme aujourd'hui connue. Puisque le processus fait intervenir une dose d'aléa, cette description infléchit notablement la manière dont on peut appréhender le sens même d'une loi. Pour reprendre l'expression de Lee Smolin, le grand spécialiste de gravitation quantique de l'Institut Perimeter au Canada, les lois sont donc à réinterpréter comme de simples paramètres environnementaux. Elles auraient pu être autres : la contingence s'invite au cœur même de la nécessité. Tous comme les phénomènes, il semble que les lois, elles aussi, aient une histoire. C'est un changement majeur dans notre manière de comprendre la physique. Je ne serais d'ailleurs pas étonné que l'émergence d'une « direction » particulière pour l'écoulement du

temps résulte elle-même d'une brisure de symétrie et qu'il existe d'autres zones dans lesquels cette direction est différente. C'est une hypothèse étayée par des résultats récents de cosmologie quantique mais elle reste hautement spéculative.

Gigantisme de l'infiniment petit

La physique des particules, tout aussi essentielle en tant que telle qu'en tant qu'ingrédient nécessaire à la cosmologie, requiert des machines immenses. Le grand accélérateur LHC du CERN (Centre européen de recherche nucléaire), à Genève, présente une circonférence de 27 kilomètres et est enfoui à 100 mètres sous Terre. Quatre détecteurs principaux sont placés aux points de collisions et le plus massif d'entre eux pèse 12 500 tonnes, le poids de la tour Eiffel. Ce sont les monstres de l'infiniment petit. Il n'y a pas d'autre moyen connu pour appréhender la structure intime de la matière et une grande partie de la communauté mondiale participe à cette aventure. On m'a souvent demandé si le coût du LHC était bien raisonnable. Il s'élève en effet à plusieurs milliards d'euros. Un coût comparable à celui des très grands télescopes en projet. En un sens, face à la détresse et à la pauvreté extrême d'une large part de la population mondiale, toute dépense consacrée à autre chose qu'au sauvetage des plus nécessiteux est choquante. Je le pense sincèrement. Pourtant, dans la société contemporaine, où, sur le marché des devises, s'échangent 4 000 milliards de dollars par jour, où quelques fonds d'investissement sans scrupule (les véritables racailles à mes yeux) peuvent de façon totalement artificielle mettre un pays – peut-être un continent – en faillite pour spéculer sur le marché de sa dette, je peine à me convaincre que l'art, la science et la culture soient les premiers postes sur lesquels des économies doivent être faites.

C'est une question politique. La science est faite par des hommes pour des hommes et relève, bien évidemment, de décisions collectives. Il me semble juste que l'ensemble de la population tranche sur les grands choix stratégiques de l'orientation nationale. La science peut n'être pas une priorité, si tel en décide la population. Mais laisser croire, comme c'est trop souvent le cas, qu'il s'agit d'un axe soutenu par l'État alors même que nous ne parvenons plus à payer le chauffage dans des laboratoires notés A+ (le meilleur grade) est un peu déstabilisant. En dépit d'une certaine mauvaise foi dans le discours politique, les restrictions budgétaires ne constituent pas l'aspect le plus scandaleux : en période difficile, il est normal que le monde scientifique fasse également des efforts. C'est la dégradation de l'état d'esprit général qui me peine principalement. L'importation, dans le secteur de la recherche, des pires travers du monde des entreprises privées fut à

mon sens une grave erreur : évaluations systématiques, mise en concurrence des chercheurs, régime de suspicion, discriminations (fussent-elles symboliques, mais les symboles comptent)... Le chercheur se mue lentement en « faiseur de dossier ». La finalité, la recherche de connaissance, la découverte de nouveaux objets, l'invention de théories est de plus en plus ignorée ! La recherche est, par définition, la confrontation avec l'imprévu. Il est tout simplement impossible d'anticiper le développement d'un modèle ou les résultats d'une mesure. Par essence de la recherche fondamentale. Je pense que cette triste situation provient d'une part d'une phobie idéologique de la liberté au sein des régimes conservateurs (ce dont les artistes et tous les intellectuels souffrent autant que les scientifiques), mais aussi d'une profonde incompréhension des mécanismes de la création. La vision « commerciale » du monde qui tend à s'imposer oublie que les chercheurs (comme, je crois, la totalité des humains) ne fonctionnent pas à la carotte et au bâton : ces processus d'évaluation et de récompense ont eu comme unique effet de tuer l'enthousiasme et de désespérer ceux qui ont vu leur profession de scientifique se transformer en démarche de *marketing manager*. Il est des activités (j'irais jusqu'à dire : la plupart) qu'on ne peut pas et ne doit pas évaluer simplement par une hiérarchisation caricaturale. L'invention d'idées nouvelles est un cheminement complexe qu'il est impossible de financer sur des projets à court terme évalués à court terme. Je pense – comme la majorité des scientifiques – que les grandes avancées du dernier siècle, celles qui furent par exemple couronnées par des prix Nobel, ne pourraient pas avoir lieu avec le système qui tend à s'imposer en Europe et aux États-Unis. Il ne s'agit surtout pas de réclamer un statut d'exception pour que les chercheurs puissent se murer dans leur tour d'ivoire : tout au contraire, j'aimerais que, dans toutes les strates de la société, il soit enfin possible de jouer le libertaire contre le libéral.

Les chercheurs ont fait 8 à 9 ans d'études après le bac, suivis de 3 à 6 ans d'expérience postdoctorale en moyenne. À l'issue de ce marathon, ils se sont présentés aux concours du CNRS et des universités. En astrophysique, on compte environ 250 candidats satisfaisant ces conditions draconiennes, chaque année, pour 6 places seulement. Il n'est pas simple de devenir chercheur. Ceux qui y parviennent ont réussi ce parcours du combattant par amour de la découverte et de l'investigation, ils travaillent énormément et n'ont pas besoin de ces ubuesques évaluations, primes, classements, mises en concurrence, procédures de surveillance des initiatives, instituées au grand dam de la communauté. La « fuite des cerveaux » souvent mentionnée dans les médias est une lubie. En 15 ans d'expérience de la recherche, je n'ai jamais – pas une seule fois – vu quelqu'un refuser un poste en France

pour aller aux États-Unis ou en Angleterre. Ceux qui partent le font parce qu'ils ne se voient pas offrir de poste en France et certainement pas parce que le système anglo-saxon serait plus attrayant. Au contraire, avant de se précariser, notre système était l'un des plus attractifs au monde : le chercheur a besoin d'un minimum de sérénité – pas de luxe ou de confort mais d'un emploi pérenne qui lui permette de voir loin dans ses projets. Il lui faut une certaine sécurité matérielle pour qu'il puisse, justement, faire preuve d'audace intellectuelle. Il lui faut du temps pour développer des idées nouvelles. Très exactement ce que le financement « sur projet » et la multiplication des contrats à durée déterminée, inspirés de l'idéologie néolibérale, ne permettent pas.

J'ai eu la chance d'être recruté comme enseignant-chercheur « permanent » à tout juste 25 ans. C'était assez rare mais cela serait, je crois, tout à fait impossible aujourd'hui. Ce fut pourtant un gage de stabilité qui m'a offert, précisément, la possibilité d'explorer quelques chemins peu empruntés. Je ne l'aurais sans doute pas osé si, comme c'est maintenant le cas pour mes collègues débutants, il me fallait chaque année constituer un nouveau dossier pour rendre compte de mes résultats à très court terme. J'ai ensuite été nommé membre de l'Institut universitaire de France, puis professeur des universités. Cela donne quelques avantages réels et surtout un certain prestige. Avec un peu de recul, je me suis pourtant rapidement convaincu que ces statuts ne devraient pas exister. Ils ne sont acquis que très aléatoirement et suscitent une légitime déception chez ceux qui ne parviennent pas à en bénéficier. Ils contribuent à un régime d'inégalités généralisé qui ne me semble ni souhaitable, ni efficace, ni juste. Je crois que la satisfaction enthousiasmante de la découverte – qui existe bel et bien ! – devrait être notre seul guide. Ce n'est pas une utopie. Il suffirait d'une simple décision commune : une classe unique de chercheurs sans distinction de « grades ». Je suis intimement convaincu que l'ambiance y serait apaisée et la véritable motivation à nouveau placée au cœur des enjeux. Les jeunes chercheurs ne seraient plus alors contraints de penser en termes de nombre d'articles, de « facteur d'impact », puis de « promotions » possibles mais en termes d'avancées scientifiques réelles ! Il ne s'agit certainement pas de « niveler par le bas » mais, au contraire, de laisser les différences – évidemment inévitables et souhaitables – se déployer suivant les véritables impulsions scientifiques, hors de toute réduction hiérarchique institutionnelle. Fort heureusement, en dépit des bâtons qui furent mis dans nos roues, une certaine résistance s'est organisée et la pratique de la recherche – hors des directives et des schèmes imposés – est restée l'une des activités les plus enviables et les plus réjouissantes qui soient. « Résister, c'est créer » écrivait Gilles Deleuze²⁴. Cette résistance s'est

bien sûr salutairement déployée au-delà de la seule recherche scientifique pour lutter contre les nombreuses offensives nationalistes, sécuritaires et réactionnaires constatées dans la dernière décennie. Il est des domaines où l'enjeu est humainement bien plus grave et plus important encore que la pratique des sciences fondamentales. Inviter, comme ce fut fait, les plus aisés à convaincre les classes moyennes que leurs difficultés et souffrances proviennent des plus faibles, c'est-à-dire des plus fragiles, est proprement ahurissant. Le mythe de l'immigré, du rom ou du chômeur assisté et profiteur me paraît logiquement faux, éthiquement pernicieux et esthétiquement repoussant. La logique qui l'a institué n'est pas sans lien avec celle qui a tenté d'indexer la recherche fondamentale à ses seules retombées économiques et applications industrielles. Il est, je pense, grand temps de s'en extraire.

Les difficultés du Big Bang : matière et énergie noires

« Tous ceux qui ont essayé de contourner cette volonté de vérité et de la remettre en question contre la vérité, de Nietzsche à Artaud et à Bataille, doivent nous servir de signes. »

Michel Foucault, L'ordre du discours.

La relativité générale montre que l'espace est dynamique et que l'expansion de l'Univers est précisément ce mouvement de dilatation de la trame géométrique. En parallèle, la physique des particules élémentaires permet de comprendre ce qu'a été et ce qu'est le contenu de l'Univers. L'ensemble est remarquablement cohérent. La lumière, puis la matière, ont successivement dominé et dicté leurs lois à la dynamique cosmique. Le modèle permet donc de retracer l'histoire de l'Univers et les observations sont effectivement expliquées par ces deux théories complémentaires. C'est un indéniable succès. Deux problèmes majeurs viennent pourtant fragiliser ce magnifique ensemble et constituent donc nos sujets de recherche privilégiés.

Matière noire

La quasi-totalité de la masse visible de l'Univers se trouve sous forme d'étoiles. Les planètes, aussi nombreuses soient-elle, sont légères et ne sont d'ailleurs pas facilement visibles hors du système solaire. Or, curieusement, on sait aujourd'hui que les étoiles contribuent très peu à la masse totale de l'Univers. L'essentiel est donc invisible ! C'est ce qu'on nomme le mystère de la « matière noire ». Il existe de la matière noire standard (les physiciens disent « baryonique ») qui est constituée, comme on peut l'attendre, des particules élémentaires connues. Cette matière noire standard est environ dix fois plus abondante que les étoiles ! Elle demeure toujours en partie mystérieuse même si l'on croit aujourd'hui, après avoir longtemps pensé qu'il s'agissait d'étoiles « ratées », qu'elle est composée de gaz essentiellement réparti entre les amas. Mais, plus étonnamment encore, il existe aussi de la matière noire non-standard (qu'on nomme donc « non-baryonique »). Celle-ci n'est pas constituée des entités élémentaires identifiées dans le cadre de la physique des particules !

Elle est donc un double paradoxe : non seulement une énigme de cosmologie mais aussi une énigme de physique de l'infiniment petit. Et cette matière noire non-standard est encore cinq fois plus abondante que la matière noire standard, elle-même dix fois plus abondante que la matière visible ! L'essentiel de la masse de l'Univers, environ cinquante fois plus importante que la totalité de la masse visible, est donc de nature inconnue.

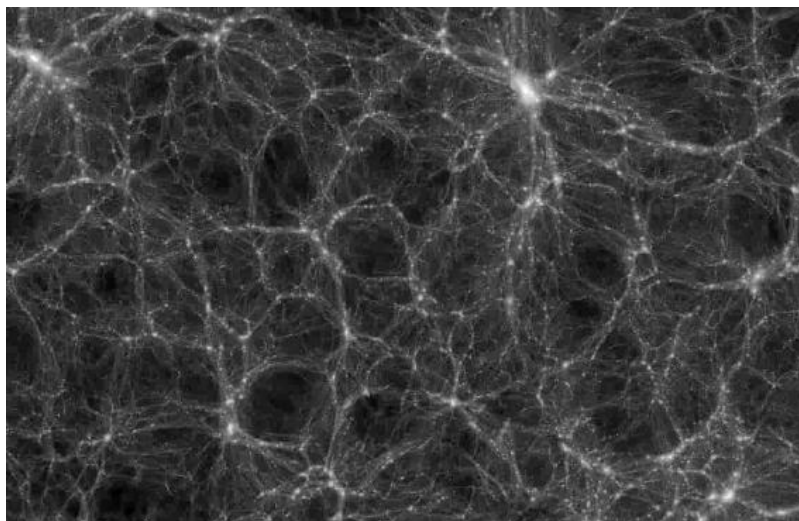
Cette situation est si étrange qu'il fallut, là encore, plus d'un argument pour s'en convaincre.

D'abord, on observe que la vitesse de rotation des étoiles autour des centres des galaxies est plus grande que prévue. Les vitesses mesurées requièrent l'existence d'une quantité importante de matière invisible. Les étoiles périphériques devraient tourner nettement moins rapidement si la seule matière visible contribuait à la masse des galaxies. Ensuite, comme dans presque tous les domaines de la cosmologie, le rayonnement fossile, observé dernièrement avec une précision inégalée par le satellite Planck, apporte des informations précieuses qui indiquent elles aussi de façon claire l'existence de matière noire. Ces mesures permettent en outre de bien distinguer la quantité de matière noire standard de la quantité totale de matière noire non-standard car l'une et l'autre se couplent différemment avec la lumière et laissent donc des empreintes qu'il est possible de séparer. Enfin, il existe une preuve simple et assez irréfutable : le rayonnement fossile permet de « voir » directement les « grumeaux » qui se trouvaient dans l'Univers quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang. Or, on peut observer ces mêmes structures aujourd'hui dans la répartition des galaxies. Les calculs permettant de déduire la répartition actuelle à partir de la répartition primitive sont fiables et ne reposent que sur de la physique élémentaire. Or ces calculs montrent qu'il est, là aussi, impossible de rendre compte des inhomogénéités contemporaines à partir des inhomogénéités primordiales sans une large quantité de matière noire. D'autres indications encore contribuent à faire de cette énigme de la matière noire l'un des mystères les plus sérieux de la physique contemporaine.

Hypothèses

Face à cette étrange situation, deux solutions émergent. La première consiste à supposer qu'il existe vraiment de la matière noire disséminée dans l'Univers et nettement plus abondante que tout ce qui est visible. La seconde consiste à remettre en cause nos théories. En effet, l'existence de cette matière sombre est déduite de l'inadéquation entre des mesures et un modèle. Si le modèle est faux, il devient envisageable qu'il n'existe en fait aucun constituant supplémentaire

dans le cosmos. C'est une possibilité qui doit toujours être envisagée et elle l'a effectivement été. Je n'ai, comme de nombreux collègues, été convaincu que l'hypothèse d'une modification de la théorie n'était pas correcte que récemment. La démonstration est fondée sur la magnifique technique des lentilles gravitationnelles. La relativité générale montre que l'espace est courbé par la matière. En observant la manière dont les images de nombreuses galaxies lointaines sont déformées par un amas, il est donc possible d'en déduire la masse à l'origine de ce phénomène. C'est une mesure directe de la distribution de matière. Mais, par ailleurs, on a pu aussi observer la masse visible de ce même amas. Et il apparut que les centres de l'une et de l'autre ne coïncidaient pas, suite à une collision cosmique. Il est impossible de rendre compte simplement de cela en modifiant la théorie de la gravitation : si la matière visible était à l'origine des effets gravitationnels, même dans une théorie nouvelle et non encore élaborée, ils devraient être « centrés » sur celle-ci. Cette vieille question est donc essentiellement tranchée depuis peu : il existe bel et bien de la matière noire dans l'Univers.



La comparaison de ces simulations avec les observations est riche d'informations sur la matière noire et l'énergie noire.

*Simulation de la distribution de matière dans l'Univers
laissant apparaître des filaments de galaxies*

Mais cela ne nous dit pas ce qu'elle est ! Tout au contraire, l'énigme n'en est que renforcée puisqu'on sait qu'elle n'est pas, pour l'essentiel, constituée des particules connues. Il faut une solution qui vienne de la physique des particules. Récemment, la découverte du boson de Higgs

au LHC a achevé l'unification des forces électromagnétiques et nucléaires faibles. C'est un immense succès : la prédiction théorique a été vérifiée expérimentalement 45 années plus tard. Mais l'unification avec la force nucléaire forte n'est toujours pas effectuée, et celle avec la gravitation moins encore. Le modèle le plus simple permettant de réunir les trois forces importantes à l'échelle des particules élémentaires se nomme SU(5). C'est une belle théorie qui intègre les leçons des succès immenses du modèle électrofaible (de l'unification réussie des forces électromagnétiques et nucléaires faibles). Elle fait partie des propositions si évidentes qu'il est à peine nécessaire de les tester. La cohérence mathématique de SU(5) est telle, et ses fondements physiques sont si naturels, qu'elle ne « peut pas » être fausse. Pourtant, SU(5) fut mise à l'épreuve de l'expérience et... infirmée par celle-ci ! Depuis, la physique des particules est, dans une certaine mesure, en crise. La meilleure idée, pour compléter le modèle standard actuel, se fonde sur le recours à une nouvelle symétrie. Une symétrie si remarquable qu'elle fut baptisée supersymétrie. Celle-ci présente de nombreux avantages théoriques. Elle est la seule symétrie qu'on puisse ajouter au modèle standard tout en respectant certaines conditions mathématiques élémentaires. De plus, elle permet à l'intensité des forces de converger vers une même valeur, ce qui est nécessaire pour les unifier. Enfin, elle conduit à une masse du boson de Higgs compatible avec les mesures. Sans compter qu'au niveau conceptuel, elle jette un pont entre le monde des « forces » et le monde des « particules » qui sont habituellement considérés comme disjoints du point de vue mathématique. C'est une belle théorie.

Le point remarquable vient de ce que la supersymétrie pourrait, justement, permettre d'expliquer la matière noire. Elle prédit en effet l'existence d'une particule lourde, stable et interagissant peu avec la matière environnante. Exactement les caractéristiques requises pour les entités qui doivent composer la matière invisible ! Nous ne disposons pas de beaucoup d'alternatives, c'est donc une piste privilégiée. Si la supersymétrie est une théorie correcte, elle doit être confirmée avec les accélérateurs de particules. Sa mise en évidence serait une contribution majeure à la physique de l'infiniment petit ainsi qu'à celle de l'infiniment grand. Pour le moment aucune trace de supersymétrie n'a pourtant été observée. Le problème demeure donc et la matière noire garde tout son mystère...

Énergie noire

Mais un autre problème, que certains jugent plus crucial encore, défie la cosmologie moderne. L'Univers est en expansion. Cela n'est pas un paradoxe. Tout au contraire, c'est une prédiction claire de la théorie

d'Einstein corroborée depuis un siècle par les observations. Mais il y a quelques années une poignée de chercheurs ont entrepris, dans l'indifférence générale, de mesurer précisément la décélération de L'Univers. Puisque la gravitation est attractive, elle agit comme une sorte de force de freinage. L'Univers doit donc grandir de moins en moins vite, il doit décélérer. À l'instar d'un vélo qui avance, mais de plus en plus doucement, à cause du frottement de l'air et de la route. La mesure de la valeur exacte de cette décélération n'était pas un problème central de cosmologie et s'inscrivait au rang des petites investigations secondaires à mener à défaut de projets plus ambitieux. La méthode est assez simple. Certaines supernovae, des étoiles en fin de vie, explosent en émettant toujours la même quantité de lumière. En mesurant la proportion de cette lumière atteignant un télescope sur Terre, on peut donc en déduire leur distance. Un peu comme une flamme de bougie : plus elle est vue faiblement, plus la bougie est éloignée de l'œil qui la scrute ou du détecteur qui l'étudie. Par ailleurs, l'effet Doppler, le fait que la longueur d'onde change quand une source est en mouvement, permet de mesurer la vitesse de celle-ci. On peut ainsi connaître la vitesse d'éloignement des supernovae en fonction de leur distance. Elle trace directement la vitesse d'expansion de l'Univers puisque les astres ne se meuvent pas de façon importante sur la trame de fond à ces échelles. Étant donné que la lumière se déplace à une vitesse finie, voir loin, c'est voir tôt. Il est donc possible d'accéder à l'évolution de la vitesse en fonction du temps, c'est-à-dire à la décélération cosmique. Une telle approche fut effectivement mise en œuvre et conduisit en fait à un résultat inattendu et tout à fait prodigieux : la décélération de l'Univers est négative ! Autrement dit : l'Univers accélère ! Il ne se contente pas de s'agrandir, il s'agrandit, en fait, de plus en plus vite... Comment est-ce possible alors que la gravitation attire et doit donc freiner ?

Il s'agit sans aucun doute de l'un des résultats les plus importants de ces dernières décennies. Non seulement pour la cosmologie mais aussi pour la physique en général. On peut évaluer l'énergie associée à ce processus d'accélération. Elle s'avère être presque trois fois plus importante encore que celle de la matière noire ! On la nomme « énergie noire ». Un terme qui masque pudiquement notre incompréhension du phénomène. Quelque chose, quelque chose de mystérieux qui constitue l'essentiel du contenu de l'Univers, pousse l'espace à s'étendre de plus en plus vite. On peut raisonnablement y voir les traces d'une nouvelle force. Inconnue et répulsive à grande distance. Une force qui ne ressemble à rien d'identifié à l'heure actuelle. Une cinquième force peut-être ? Autrement dit, une quintessence. L'enjeu est si considérable et la situation si étrange que de très nombreux physiciens théoriciens travaillent aujourd'hui sur

cette question. Il n'est pas exagéré de dire que trois ou quatre articles, en moyenne, sont publiés chaque jour sur ce sujet et qu'il existe sans doute plusieurs centaines de modèles différents pour tenter d'expliquer le phénomène. En un certain sens, la relativité générale peut sembler fournir une explication simple à cette situation. Les équations d'Einstein comportent en effet un terme, une constante cosmologique, qui peut engendrer une telle accélération. Il existe donc une solution plus naturelle et plus immédiate que pour la matière noire. Néanmoins, la mécanique quantique impose aussi ses lois et n'autorise pas la valeur effectivement observée.

Le LSST

Il ne faut bien sûr pas se laisser trop griser par ces questions, aussi fascinantes soient-elles. Ce que m'a appris mon premier maître de stage quand j'étais en première année d'école d'ingénieur, le grand astronome Audoin Dollfus, fameux tout autant pour ses découvertes – en particulier celle d'un nouveau satellite de Saturne – que pour ses épiques vols en ballons stratosphériques. Lors d'un déplacement au Pic du Midi, avant que cet observatoire mythique des Pyrénées ne devienne un lieu touristique, il m'expliquait que beaucoup reste encore à comprendre au sein du système solaire : « est-il bien raisonnable de spéculer sur le Big Bang et la matière noire quand nous comprenons si mal le Soleil et ses planètes ? » aimait-il à rappeler. L'intelligence exceptionnellement alerte de ce vieux monsieur infatigable et bienveillant m'a marqué. De même, d'ailleurs, que ses légendaires empilements de tasses à café – jusqu'au plafond les meilleurs jours – dans la cuisine du Pic ! Régnait en ce lieu une ambiance indescriptible que je n'ai pas retrouvée dans les observatoires modernes, au Chili par exemple, où le ciel est pourtant plus sublime encore.

Ce problème de l'énergie noire m'a néanmoins paru suffisamment important pour que je décide d'y consacrer une part importante de mon temps pour de nombreuses années. Il existe plusieurs approches pour chercher des réponses à cette question mais celle du grand télescope LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*) m'a semblé particulièrement prometteuse. À dire vrai, seule une infime fraction du ciel a jusqu'à maintenant été observée à des profondeurs importantes. Les très grands télescopes, comme le VLT (européen) ou le Keck (américain), ont de minuscules champs de vue et ne scrutent donc que des portions dérisoires de la voûte céleste. Tout au contraire, le LSST est conçu pour observer la totalité du ciel. Il permettra donc, pour la première fois dans l'histoire, de connaître la position tridimensionnelle de milliards de galaxies. C'est une nouvelle carte de

l'Univers qui se dessinera. Il est d'ailleurs amusant que l'entreprise Google contribue au projet pour adjoindre un « Google Universe » au maintenant célèbre « Google Earth ».

Bien que la recherche dans de très grandes collaborations soit toujours particulière eu égard à la difficulté de travailler en équipe avec plusieurs centaines de personnes, l'ambiance est étonnamment sereine et conviviale dans l'expérience LSST. Ce n'est pas un détail. J'ai pris la responsabilité du banc de test et d'étalonnage de la caméra du LSST qui, avec 3,3 milliards de pixels et 3 tonnes, sera la plus complexe construite à ce jour. Pour ce type de mesures astrophysiques, extrêmement fines, une connaissance quasi parfaite de l'instrument est indispensable. Et cette tâche est loin d'être triviale : c'est une question d'ingénierie mais aussi de physique fondamentale. En parallèle, nous travaillons sur des algorithmes permettant de déterminer la distance des galaxies à partir des mesures qui seront, à l'horizon 2020, effectuées par le LSST. C'est un point complexe parce que cette grandeur ne se livre pas directement à l'observation : il faut tenter de la « reconstruire » à partir de modèles détaillés. Observe-t-on une galaxie très lumineuse et lointaine ou proche et au flux ténu ? La réponse n'est jamais simple. Elle est pourtant essentielle pour obtenir une carte digne de ce nom.

Quel lien avec l'énergie noire ? Il en existe en fait de nombreux ! Celui qui me semble le plus simple et le plus convaincant a trait aux « oscillations acoustiques de baryons », les BAO. Dans l'Univers primordial, on sait – puisqu'on le voit avec le rayonnement fossile – qu'il existait de petites fluctuations de densité. Et celles-ci sont toujours visibles aujourd'hui dans la distribution des galaxies. Leur répartition spatiale n'est pas tout à fait homogène : on peut y déceler la présence de ces ondes venues des premiers instants. Comme toutes ondes, elles sont caractérisées par une « longueur d'onde ». Il suffit de mesurer comment cette longueur évolue avec le temps pour obtenir un film de l'évolution de l'Univers ! Nous disposons, en quelque sorte, d'une échelle standard que nous observons grandir : exactement ce qu'il faut pour sonder en détail la dynamique du cosmos et donc mieux comprendre la mystérieuse énergie noire qui préside à son accélération. Qu'il s'agisse d'une constante cosmologique ou d'une cinquième force, le film ne sera pas le même.

Incontestablement, le modèle cosmologique est donc loin d'être achevé. Chaque avancée, chaque compréhension nouvelle, chaque découverte est accompagnée de son lot d'interrogations. Plus le savoir est affiné, plus les questions sont raffinées. C'est un jeu où l'on ne gagne jamais vraiment. Où l'on ne perd pas non plus. Le jeu est à lui-même son propre but. Il s'agit moins de connaître que de toucher. D'ouvrir une brèche dans le mur des possibles. De perforer un

embryon de réel. De modeler un discours aux prises avec le monde. Une pensée inventée et pourtant hétéronome. Comme l'a montré, à propos de la littérature, mon ami Jean-Luc Nancy – immense philosophe, poète aussi, très proche de Jacques Derrida – il s'agit toujours, sous une forme ou sous une autre, d'un contact. C'est un peu l'enjeu du travail que Jean-Luc et moi avons mené ensemble : interroger le statut d'un frôlement du multiple et du désordre, y compris du point de vue des sciences physiques. Ne peut-on, ne doit-on, pas s'extraire enfin des mythes de l'Un et de l'Ordre qui vertèbrent notre science ? Notre vieille civilisation s'est construite dans le fantasme de l'unité et de l'ordonnancement. La dialectique bien huilée qui enchevêtre ces deux piliers devrait, peut-être, être enfin ébranlée.

Au-delà du Big Bang : théorie des cordes et gravitation quantique

« Il y a quelque chose qui est pour ainsi dire la mauvaise conscience de la bonne conscience rationaliste et le scrupule ultime des esprits forts ; quelque chose qui proteste et « remurmure » en nous contre le succès des entreprises réductionnistes. Ce quelque chose est comparable, sinon aux reproches intérieurs de la raison devant l'évidence bafouée, du moins aux remords du for intime, c'est-à-dire au malaise d'une conscience insatisfaite devant une vérité incomplète. »

Vladimir Jankélévitch, Le Je-ne-sais-quoi et le Presque-rien.

La matière noire et l'énergie noire sont des problèmes cosmologiques majeurs. Comme d'ailleurs la dissymétrie globale de l'Univers qui semble préférer la matière à sa « consœur ennemie » l'antimatière. Mais je pense qu'il y a plus grave encore : le Big Bang lui-même ! Non pas le modèle du Big Bang, entendu au sens large comme description de l'Univers en expansion, qui ne pose aucun problème. Il est tout au contraire singulièrement cohérent. Mais le Big Bang en tant qu'instant primitif et originel. Ce Big Bang constitue ce qu'on nomme, en mathématiques, une singularité. Il est donc un lieu (ou un temps, les deux concepts ne sont pas ici disjoints) où les grandeurs physiques divergent, c'est-à-dire tendent vers l'infini. La courbure et la densité d'énergie, par exemple, y deviennent arbitrairement grandes. Ces comportements incompréhensibles ne sont sans doute pas des pathologies de l'espace-temps lui-même, mais bien plutôt de la théorie qui le décrit. Au moment du Big Bang, comme au centre des trous noirs, la relativité générale ne fonctionne plus. Cette situation n'est pas anodine : le Big Bang est une prédiction inévitable de la théorie là où, précisément, la théorie cesse d'être valide ! Notre modèle cosmologique se bâtit ainsi à partir d'un état qui n'est pas physiquement défini. La raison de ce dysfonctionnement de la théorie d'Einstein tient probablement à son caractère « classique ». Dans ce genre de situations, il est nécessaire de recourir à une description « quantique » du monde. Ce sont, par exemple, les effets quantiques qui stabilisent l'atome d'hydrogène et l'empêchent de développer une

singularité. Hélas, il est extrêmement difficile de construire une théorie de la relativité générale quantique. Depuis près d'un siècle la plupart des physiciens théoriciens les plus brillants s'y sont essayés. Sans grand succès. Deux voies particulièrement prometteuses se distinguent néanmoins : la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes.

Gravitation quantique à boucles

J'avais, comme tous les physiciens de mon domaine, entendu parlé de gravitation quantique à boucles. Sans vraiment savoir de quoi il s'agissait : une théorie complexe, mathématiquement élégante mais délicate à aborder. Les choses ont grandement changé pour moi il y a quelques années. D'abord grâce à l'audace créative de mon ami Julien Grain qui a osé se plonger dans quelques articles très techniques et s'est rendu compte que les méthodes que nous avions développées, lors de sa thèse, pour étudier la propagation des champs quantiques au voisinage des trous noirs pouvaient être utilement appliquées à des situations pertinentes en gravitation quantique à boucles. Ensuite, parce que j'ai eu le plaisir de rencontrer Carlo Rovelli, l'un des créateurs de cette théorie. L'intelligence subtile, modeste et extraordinairement fructueuse de Carlo, avec qui j'échange maintenant souvent – au point que nous avons tenté de construire ensemble un « groupement de recherche » en gravité quantique – m'ont immensément impressionné. Non content d'avoir contribué à inventer l'une des rares théories convaincante de gravitation quantique, Carlo a développé une interprétation originale de la signification du temps en physique et de la mécanique quantique. Je le considère comme l'un des physiciens les plus géniaux actuellement vivants. Que ce talent scientifique soit accompagné de qualités humaines et d'une évidente humilité contribua à rendre, pour moi, cette rencontre plus que signifiante. J'aime profondément cette générosité, cette manière de respecter l'autre *a priori*. Bien sûr, des différends intellectuels peuvent ensuite survenir, mais le premier pas est ici bienveillant. C'est un rapport-au-monde admirable et finalement assez rare chez les grands esprits. J'ai retrouvé cela chez mon ami Pierre Salati, spécialiste très reconnu du rayonnement cosmique avec qui j'ai travaillé sur la diffusion des antiprotons dans la Galaxie, ou chez Jacques Lambert, épistémologue et humaniste érudit qui m'a fait l'honneur d'encadrer mon mémoire de Master de philosophie, il y a de nombreuses années. J'aime cette lueur d'amour qui ne nuit pas à l'intelligence du regard, tout au contraire.

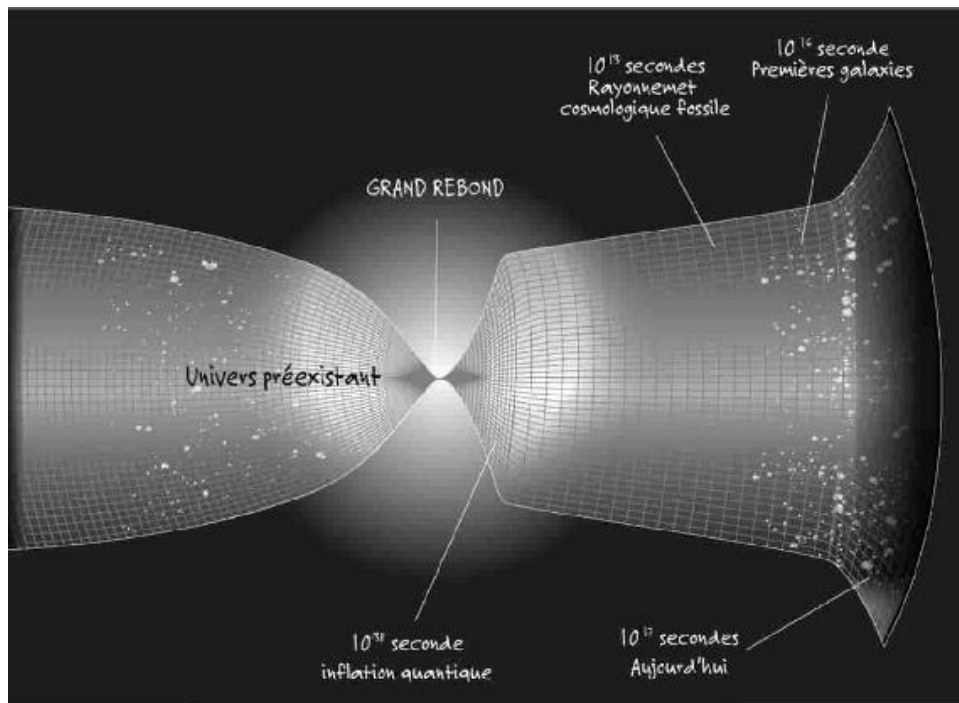
La gravitation quantique à boucles tente de prendre au sérieux les leçons de la théorie d'Einstein. En particulier le cœur de celle-ci :

l'invariance de fond, le fait qu'il n'existe plus aucune « structure » figée dans le monde. Tout y est relationnel. Mais elle cherche aussi à intégrer les principes les plus fondamentaux de la mécanique quantique, notamment le fait que l'ordre dans lequel on opère les mesures est important. Il y a un peu de plus 25 ans, Abhay Ashtekar – aujourd'hui directeur de l'« Institut pour la gravitation et le cosmos » de l'université d'État de Pennsylvanie – a réussi à réécrire la relativité générale d'une manière qui permettait de la rendre compatible avec la mécanique quantique ! Le travail a été long et dur mais, avec quelques autres, Carlo Rovelli y est parvenu. Aujourd'hui, plus de cent chercheurs dans le monde travaillent sur cette théorie. Elle n'est évidemment pas achevée mais a fait la preuve de sa remarquable cohérence. Différentes manières de la formuler semblent conduire au même paradigme ce qui renforce la fiabilité de l'édifice.

En gravitation quantique à boucles, l'espace-temps n'est plus une trame continue. Il faut imaginer un réseau d'une immense complexité. De la même manière que la matière est composée d'atomes, l'espace serait composé de petits grains élémentaires. Comme l'ensemble est quantique, son évolution doit être pensée en termes probabilistes. Si ce modèle – ce que les spécialistes nomment une mousse de spins – était correct, il s'agirait bien sûr d'une immense révolution. Il ne décrit pas le mouvement ou la composition d'objets se trouvant dans l'espace et le temps mais de l'espace et du temps eux-mêmes. L'Univers y apparaît alors comme une collection de champs quantiques en interaction. Il n'y aurait plus aucune « méta structure » sur laquelle ces champs se déploieraient. Aujourd'hui, la dynamique de cet espace-temps quantique, granulaire, commence à être bien comprise grâce à plusieurs approches complémentaires. Vraie ou fausse, le fait est que la théorie réussit le tour de force consistant à concilier les éléments fondateurs de la relativité d'Einstein d'une part et de la mécanique quantique d'autre part. Appliquée aux trous noirs, elle permet de donner enfin un sens à cette mystérieuse entropie : les états quantiques de l'horizon « stockent » l'information qui semblait perdue ! Ces conclusions suscitent de très nombreux et intenses débats dans la communauté. Récemment, un jeune physicien du Perimeter Institute, temple de la physique théorique au Canada, les a poussés plus loin encore, non sans engendrer une certaine controverse. Il pense, mais la démonstration n'est pas tout à fait limpide, avoir prouvé que l'entropie ne dépendait pas du paramètre libre, autrement dit inconnu, de la théorie. Ce serait remarquable ! Le modèle se développe rapidement. Des phases d'immenses espoirs et de bonds en avant succèdent à de longues stagnations, parfois à des régressions. Ainsi en va-t-il de la création d'une nouvelle représentation du monde.

Avant le Big Bang

L'un des succès majeurs de la gravitation quantique à boucles provient de son application à la cosmologie. Martin Bojowald, brillant chercheur allemand travaillant aujourd'hui aux États-Unis, a montré au début des années 2000 que la singularité du Big Bang disparaissait ! C'est un résultat essentiel. L'aporie – la contradiction – principale de la cosmologie contemporaine est donc ici résolue. Comme on pouvait l'espérer, mais ce n'était pas tout à fait évident, la quantification des équations d'Einstein par la méthode des boucles lisse la divergence originelle. Les grandeurs physiques ne tendent plus vers l'infini, la théorie n'est plus pathologique. Mais si le Big Bang disparaît, par quoi est-il donc remplacé ? Par un grand rebond, un Big Bounce. Autrement dit, l'Univers n'a plus d'origine ! Dans ce modèle, il existe de toute éternité et ce qu'on nommait Big Bang ne correspond en fait qu'à un « goulet d'étranglement », à une gorge rabelaisienne : avant le rebond, existait une phase de contraction, tandis qu'après celui-ci, prend naissance l'expansion dans laquelle nous nous trouvons en ce moment. Peut-être ceci s'est-il produit plusieurs fois, ou même une infinité de fois, conduisant alors à l'image d'un Univers cyclique rappelant quelques grandes cosmogonies antiques. C'est toute l'image de l'origine de l'Univers qui se trouve ici chamboulée. Si cette description est correcte, la question de l'émergence du cosmos ne se pose plus. Il s'agirait, bien sûr, d'une grande économie conceptuelle au niveau métaphysique.



Représentation de l'évolution de l'Univers dans un modèle de rebond tel que prédit par la cosmologie quantique à boucles

Je me suis intéressé à la cosmologie quantique à boucles dans l'espoir d'utiliser les observations astrophysiques pour conforter ou infirmer ce modèle. Il y a peu, la gravitation quantique était considérée comme essentiellement instable, comme une spéculation mathématique inaccessible aux mesures. Le fait que ce grand rebond ait pu laisser des traces infimes dans le cosmos, aujourd'hui encore éventuellement observables, ouvre enfin une voie de mise à l'épreuve de la théorie. Les empreintes sont néanmoins subtiles. Avec Thomas Cailleteau, mon étudiant en doctorat, maintenant en postdoc avec Abhay Ashtekar, nous avons étudié différentes signatures qui pourraient être laissées par la gravité quantique à boucles dans le rayonnement fossile. Elles ne seront pas simples à mettre en évidence. Il est même possible qu'elles ne puissent jamais l'être. Cela ne dépend pas uniquement de la théorie mais aussi de paramètres contingents, c'est-à-dire de la chance que nous aurons... ou pas ! Pourtant, si la nature a été clémente, nous avons calculé qu'il était possible que de futures expériences de cosmologie détectent un déficit de puissance aux très grandes échelles qui constituerait une signature du modèle. Et aussi, d'une certaine manière, une porte entrouverte sur l'Univers d'avant le rebond. La gravitation quantique et la cosmologie des origines – au sens fort –

entrent enfin dans le champ de la science observationnelle.

Mais nous avons aussi trouvé une conséquence inattendue de la gravitation quantique à boucles. Dans le modèle cosmologique standard, on suppose que peu après le Big Bang eut lieu une phase d'inflation, une croissance considérable de la taille de l'Univers. Celle-ci est nécessaire, non seulement pour expliquer pourquoi l'Univers est si homogène et peu courbé, mais aussi pour générer les petites fluctuations à l'origine des structures cosmiques. Or cette inflation est ajoutée de manière *ad hoc* dans le modèle cosmologique usuel. Elle est introduite de façon assez artificielle et, surtout, requiert des conditions initiales, c'est-à-dire un état physique au moment où elle prend naissance, très spécifiques. Étonnamment, le Big Bounce de la gravitation quantique à boucles résout aussi ce problème ! Nous avons montré – conjointement avec le groupe d'Abhay – que l'inflation était une conséquence presque inévitable du modèle. Si nous étions dans les années 1970 et que nous avions utilisé les méthodes de la gravitation quantique à boucles pour quantifier les équations d'Einstein, nous aurions pu prédire l'inflation bien avant qu'elle soit ajoutée « à la main » au scénario cosmologique. Bien sûr, l'aventure ne s'achève pas ici. Beaucoup reste encore à comprendre. J'aimerais, en particulier, chercher à savoir si cette prédiction reste valide quand on tient compte de ce que durant la phase de contraction les différentes directions de l'espace ne jouent plus des rôles équivalents dans l'Univers. Un peu comme si le cosmos se déformait. Ces déformations ne sont pas anecdotiques, elles influent considérablement sur la dynamique. Personne ne connaît aujourd'hui leurs réelles conséquences. Et surtout, j'aimerais comprendre la signification du changement de signature de la métrique que nous venons de calculer : un résultat supposé par Stephen Hawking, et d'autres, depuis bien longtemps mais qui semble maintenant enfin démontré dans ce contexte. Cela signifie que le temps semble devenir « imaginaire » au voisinage du Big Bounce. Que cela implique-t-il vraiment ? Est-il encore possible de parler d'évolution ? Nous ne sommes pas au bout de nos peines mais, manifestement, les choses sont, en cosmologie quantique à boucles, plutôt bien parties !

Théorie des cordes

La gravitation quantique à boucles n'est pas la seule voie possible. Depuis plus de 40 ans, la théorie des cordes est très intensément étudiée. Son pari est différent : ce sont ici les succès de la physique des particules élémentaires qui servent de guide. C'est, avant toute chose, le désir d'unification qui prévaut. De façon remarquable, si l'on suppose que les constituants fondamentaux ne sont plus des objets

ponctuels mais plutôt des petits élastiques, la situation change radicalement. En particulier, certaines excitations de ces cordes quantiques correspondent à ce qu'on nomme des « gravitons », c'est-à-dire aux médiateurs de la gravitation ! En un sens, la théorie des cordes prédit donc de façon automatique la gravité. Et elle permet d'unifier tous les constituants connus qui sont réinterprétés comme différents modes de vibration possibles d'une unique classe de cordes fondamentales. À l'instar d'une corde de violon qui peut générer toutes les notes de la gamme chromatique suivant la position des doigts sur le manche de l'instrument.

Ces succès sont extraordinaires puisqu'ils font de la théorie des cordes tout à la fois une théorie d'unification et une théorie de gravitation quantique, ce qui ne va pas de soi étant donné qu'il s'agit de deux questions disjointes. De plus, elle ne doit dépendre que d'un unique paramètre « libre » ce qui la rend particulièrement élégante. La physique se réécrit ici en termes de cordes se brisant ou fusionnant.

Ce magnifique cadre impose une condition forte sur l'espace. Une condition qui constitue une prédiction claire de la théorie des cordes : l'espace doit comporter 9 (ou 10 dans une certaine variante) dimensions. Hélas, il semble bien que l'espace qui nous entoure ne présente que 3 dimensions. Soit la théorie est fausse, soit ces dimensions supplémentaires sont cachées. C'est bien évidemment cette dernière solution qui est retenue par les physiciens des cordes : 6 des 9 dimensions de la théorie des cordes sont supposées être recourbées sur elles-mêmes – compactifiées dit-on – de façon si serrée qu'il est impossible de les observer simplement.

C'est ici qu'il se passe quelque chose de fascinant. Les manières de compactifier ces dimensions supplémentaires sont si nombreuses qu'il s'ensuit un nombre immense, absolument immense – disons 10^{500} au moins – de lois physiques effectives différentes possibles. C'est un véritable « paysage de lois », pour reprendre une image issue de la biologie, qui se dessine ici. Cette « théorie du tout » ouvre donc en fait sur une étonnante diversité. Une multitude de lois possibles qui surpassent tout ce qui avait pu être pensé jusqu'à maintenant. Pour beaucoup de physiciens des particules et de cosmologistes ne travaillant pas directement sur la théorie des cordes, ce tournant du « paysage » a déçu. En ce qui me concerne, il m'a tout au contraire semblé assez fascinant. Parce que ce qui se joue ici est plus qu'une simple controverse scientifique, c'est une réflexion sur la nature même de la science.

La théorie des cordes explique également la mystérieuse entropie des trous noirs. En un sens, elle le fait même mieux que la gravitation quantique à boucles puisqu'aucun paramètre n'a ici à être « ajusté »

pour obtenir le bon résultat. Mais, au contraire de cette dernière, elle ne peut le faire rigoureusement que pour des trous noirs très particuliers... Il n'est pas simple d'appliquer la théorie des cordes à la cosmologie. En discutant avec Juan Maldacena, l'un des meilleurs théoriciens de cordes, à l'Institut for Advanced Study de Princeton, j'eus l'impression distincte qu'il était pratiquement impossible de mener aujourd'hui une prédiction claire et non ambiguë dans ce cadre. C'était également son avis. Les choses, pourtant, ne sont jamais aussi simples... Et, quand bien même elles le seraient, cela ne disqualifierait pas la pertinence de la théorie des cordes. Une approche qui ne s'accorde pas avec les schèmes précédents ne doit évidemment pas être récusée à ce seul titre ! Je retournerai, bientôt, à l'Institut des Hautes Études scientifiques de Bures-sur-Yvette où je suis invité pour travailler sur ce point. La grande dextérité mathématique des chercheurs qui y résident et leur connaissance poussée de la théorie-M, le modèle spéculatif chapeautant les différentes théories de cordes et candidat déclaré au statut envié de théorie « ultime », seront plus que bienvenues pour avancer sur ces questions.

Une nouvelle métaphysique ?

J'ai beaucoup de mal à penser, surtout quand on aborde ces spéculations théoriques sur la gravitation quantique, une pratique scientifique qui ne s'accompagne pas d'une réflexion philosophique. Non pas parce que chacune serait nécessaire à la pratique de l'autre. Ce n'est pas le cas : la plupart des grands physiciens ignorent la métaphysique de leur temps. Et réciproquement. Mais plutôt parce que la philosophie, celle que j'aime – celle d'Héraclite, de Spinoza, de Nietzsche, de Derrida, de Deleuze, de Nancy, pour n'en citer que quelques-unes – est un outil redoutable pour fissurer les systèmes. Aussi géniales et sublimes soient-elles, les grandes (re)constructions systém(at)iques du réel me laissent généralement perplexe. Pensons aux mondes de Kant ou Leibniz par exemple : imposants et rassurants, magnifiques et cohérents, édifices grandioses mais absolument fermés. Ce sont des mondes clos. Ce n'est pas ici que la philosophie est, pour moi, vitale. La science et l'art m'intéressent bien davantage pour créer des engrenages et des leviers, des agencements et des structures. Au contraire, je la pense indispensable et irremplaçable pour mettre en lumière – ou peut-être plutôt en clair-obscur – les failles, les incomplétudes, les arbitraires, les non-dits, les impensés, les implicites, les oubliés, qui nervurent chacun des systèmes établis.

En ce sens, je crois que l'immense chantier esquissé par Jacques Derrida²⁵ – l'un des rares très grands philosophes qui soit aussi un très grand écrivain –, celui donc de la déconstruction, devrait être poussé

plus avant. Notre temps est peu enclin à considérer avec attention ces pensées de l'incertitude, du risque et du possible. Au moins dans le domaine institutionnel : des philosophes libres et subversifs sont heureusement encore possibles, de plus en plus souvent loin de l'université, je pense en particulier à mon amie Véronique Bergen – libre comme un rêve félin – qui enchevêtre, dans son magnifique contrepoint, des lignes poétiques, romanesques et philosophiques²⁶. Ces pensées tournées et retournées vers l'attention aux détails et aux schèmes immiscés exigent une immense attention d'un lecteur dont on attend qu'il devienne coauteur. La déconstruction derridienne, ce geste d'inconfort qui ne transige avec aucune hypothèse sous-jacente ni avec aucune ramification possible, s'est peu intéressée aux sciences dures et à leurs pratiques. J'y vois deux raisons essentielles. La première est sociologique. En 1996, un physicien américain, Alan Sokal, parvint à publier un canular destiné à mettre à mal un large pan de la philosophie postmoderne. Il a réussi à faire passer pour un article de philosophie ce qui n'était qu'une succession d'énoncés ineptes. De nombreux pamphlets s'ensuivirent tendant à montrer que la philosophie française de cette période était insensée. Cette triste affaire a placé le débat à un niveau trivial et raté les véritables enjeux. Elle ne prouve évidemment rien : appréhender la philosophie avec des arguments purement scientifiques est stérile, de même qu'appréhender la physique avec des arguments exclusivement métaphysiques conduirait à conclure injustement que la physique est insignifiante. Pourtant, l'affaire Sokal eut d'importants retentissements avec la conséquence déplorable de dissuader beaucoup de philosophes de s'intéresser aux questions scientifiques. Les sciences exactes devinrent, d'une certaine manière, « intouchables ». La seconde raison est plus importante. Elle est de nature épistémique et tient à ce que la physique peine à se penser comme une construction, comme une élaboration humaine. Ce qui serait, bien évidemment, l'étape préliminaire nécessaire à toute déconstruction.

À mon sens, et c'est l'enjeu du travail d'exploration que j'entends mener avec Marc Crépon, le directeur du département de philosophie de l'École normale supérieure, un philosophe majeur peut nous aider en ce sens. Non pas un philosophe continental de l'école phénoménologique comme on aurait pu l'imaginer mais, paradoxalement peut-être, un philosophe américain de l'école analytique. Il s'agit de Nelson Goodman. Goodman est celui qui propose de considérer la science comme une manière, parmi d'autres, de faire un monde²⁷. Il est celui qui suggère de troquer un réel donné, à découvrir, pour une myriade de mondes, coprésents, à construire. Goodman pense nos systèmes symboliques comme autant de manières possibles de faire fonctionner le réel. La physique y devient une

construction, signifiante mais non unique. Je suis étonné de constater que mes collègues se sentent souvent blessés par cette vision : « si tu vois la science ainsi, pourquoi donc la pratiques-tu ? » m'objecta-t-on souvent. Mais ce n'est pas faire offense à la recherche scientifique que lui donner le droit à n'être pas la seule version correcte du réel ! Ce serait même plutôt la hisser au rang des beaux-arts que de lui reconnaître son caractère construit et de conférer donc une authentique créativité à celui qui la dessine.

Le constructivisme goodmanien, prolongé et supplémenté par la déconstruction derridienne, ouvrirait une nouvelle brèche pour penser la physique contemporaine. Il s'agirait tout à la fois d'en réhabiliter la dignité « en tant qu'art »²⁸ et d'en approfondir les conséquences hors champ. Bien au-delà de la seule science, la démarche permettrait sans doute de diffracter une nouvelle ontologie. La théorie des cordes et la gravitation quantique ne peuvent plus être appréhendées avec les outils conceptuels issus de l'épistémologie d'un autre temps. Je crois qu'il faut, avec prudence, envisager peut-être la possibilité d'un réel plus intrinsèquement multiple que nous l'avons jusqu'alors pensé. Il ne me semble pas impossible que différentes descriptions, éventuellement antagonistes, soient simultanément acceptables. Cela ne signifie évidemment pas que tous les modèles se valent. Ce n'est bien sûr pas le cas. Il ne faut relâcher aucune exigence de qualité. Mais la science étant, par définition, une évolution permanente ne touchant jamais la vérité « en soi », toutes les théories non encore réfutées décrivent *réellement* le monde à un instant donné. Non pas dans l'attente de la théorie ultime – puisque celle-ci ne peut, telle un supplice de Tantale, qu'éternellement se dérober – mais au sens le plus fort que revêt une vérité scientifique et donc mortelle. Il s'agit de penser la coexistence dans sa densité sémantique la plus forte : ni transitivement, ni transitoirement.

J'aimerais contribuer à ces investigations comme j'ai commencé à le faire depuis quelques années. Hélène Cixous²⁹, l'amie de toujours de Jacques Derrida et l'une des écrivaines contemporaines les plus fascinantes à mon avis, m'a récemment montré – en diverses circonstances et avec cette bienveillante intransigeance que j'aime immensément chez elle – de nouvelles voies possibles pour aller plus avant. Étonnamment, la *French Theory*³⁰, la spécificité philosophique française des années 1960-1980, est aujourd'hui bien mieux comprise dans le monde anglo-saxon. C'est donc peut-être prioritairement vers ces penseurs anglais et américains qu'il faut maintenant se tourner pour comprendre et pousser plus avant l'héritage de la déconstruction. Mais le temps manque ! Même si, comme le dit Carlo Rovelli, il n'existe peut-être pas *stricto sensu* d'un point de vue physique³¹... Refusant de choisir entre physique expérimentale et physique

théorique et, parfois, entre science et philosophie, je me trouve dans une posture ambiguë. Les bons jours, ce mélange me semble singulièrement enthousiasmant. Les jours sombres, je crains, à force de dispersion, de perdre toute capacité de création. J'ai peur de me perdre dans une dissémination sans fin.

Le multivers

« (...) mauvais lecteur : j'appelle ou j'accuse ainsi le lecteur apeuré, pressé de se déterminer, décidé à se décider (pour annuler, autrement dit ramener à soi, on veut ainsi savoir d'avance à quoi s'attendre, on veut s'attendre à ce qui s'est passé, on veut s'attendre). Or il est mauvais, du mauvais je ne connais pas d'autre définition, il est mauvais de prédestiner sa lecture, il est toujours mauvais de présager. Il est mauvais de ne pas aimer à revenir en arrière. »
Jacques Derrida, La Carte Postale.

Un monde, des mondes

L'Univers est-il unique ? La question pourrait légitimement sonner comme un non-sens et le néologisme « multivers » comme un oxymore. Pourtant, cette interrogation a aujourd'hui un sens. En physique, le terme univers réfère à l'ensemble de ce qui pourrait nous être accessible. Non pas ce qui l'est effectivement, mais de ce qui pourrait l'être si nous nous déplaçons à la plus grande vitesse possible, celle de la lumière. Plus exactement, on considère que l'Univers est tout ce qui a été en contact causal avec nous : tout ce qui a pu interagir avec nous. Typiquement, c'est donc, pour les terriens, une sphère centrée sur la Terre et de quelques dizaines de milliards d'années-lumière de rayon. Ce qui se trouve au-delà de celle-ci n'a jamais pu avoir la moindre influence sur nous. Ce qui se trouve au-delà est « hors » de notre Univers. L'Univers est un concept relatif. Et, pour la première fois dans l'histoire, il semble que la science soit en mesure de réfléchir sérieusement sur son « au-delà ». L'idée même d'univers multiples pourrait mener à une révolution comparable à la rupture copernicienne.

La relativité générale, notre théorie de l'espace-temps, montre que seuls trois types de géométries sont possibles en cosmologie. On ne sait pas aujourd'hui lequel de ces trois types décrit effectivement notre Univers. Mais il est intéressant de noter que dans deux de ces trois types, l'espace est infini. Je néglige ici les subtiles questions de topologie, au risque d'endurer les critiques de mon ami Jean-Pierre Luminet qui, outre son intense activité de communication scientifique, travaille depuis de nombreuses années sur la forme globale de l'Univers. Mais si donc l'espace est infini, cela signifie nécessairement

que les univers – au sens précis que nous venons de définir – y sont en nombre infini ! Cette simple remarque n'est déjà pas anodine. S'il existe en effet un nombre infini d'univers, tout ce qui est possible, c'est-à-dire compatible avec les lois de la physique, doit s'y produire, et même s'y produire une infinité de fois. Il doit donc, par exemple, exister une infinité de copies à l'identique de chacun d'entre nous. Ces alter ego ont tous les mêmes passés mais pas nécessairement les mêmes futurs. Un univers, donc, où le dernier article que je viens d'envoyer est accepté, et un autre où je soumetts le même travail à la même revue *Physical Review* mais où il est pourtant refusé. Vertigineuse multiplication, sans limite, de chaque bribe de réel...

L'autre grande théorie physique, la mécanique quantique, n'est pas non plus en reste sur cette question des univers multiples. Les objets quantiques, généralement microscopiques, peuvent se trouver simultanément dans plusieurs états différents. Une situation que l'on ne rencontre évidemment jamais dans le monde macroscopique classique. L'interprétation commune consiste à supposer que lors de l'interaction du petit système quantique avec un imposant système classique (par exemple l'appareil de mesure) un état unique est sélectionné. C'est un postulat supplémentaire qui est conceptuellement coûteux et mathématiquement disgracieux. Tout au contraire, l'interprétation de Everett suppose que dans une telle interaction se créeraient des univers. Des univers parallèles. Qui, à la différence des précédents, ne seraient pas à une distance mesurable d'ici mais dans un « ailleurs » radical. Se déploieraient ainsi une myriade d'univers, chacun correspondant à l'un des possibles de la physique quantique. Si tant est que nos processus cérébraux soient assujettis à des phénomènes quantiques, ce qui est fort probable, il existerait donc un monde où Orphée s'est retourné vers Eurydice pour, suivant la loi d'Hadès, la perdre à jamais et un autre où – bravant l'interdit de façon finalement plus insidieuse encore – il la ramena du royaume des ombres et obligea les Parques à ressouder le fil de la vie coupé. Aussi curieuse cette multiplication des univers puisse-t-elle paraître, elle constitue sans doute la seule interprétation de la mécanique quantique tout à fait dénuée de paradoxe. De nombreux physiciens la considèrent aujourd'hui comme la plus raisonnable.

Plurivers locaux

Cette idée de mondes multiples n'est pas nouvelle. Elle traverse, en des sens très différents, toute l'histoire de la philosophie. Anaximandre évoque la multiplicité des mondes. Démocrite considère que les atomes ne sont pas seuls en nombre illimité et écrit *cosmoi*, au pluriel ! Épicure et Lucrèce prolongent et complexifient ce geste. Après la mise

en ordre opérée par les grands systèmes apologétiques du Moyen Âge, Nicolas de Cues, dans sa *Docte Ignorance*, puis le génial et immensément subversif Giordano Bruno³² évoquent des mondes distincts les uns des autres. Son frère d'intellect français, Rabelais³³, y réfère également au détour d'un recours au philosophe grec Pétron. Bruno est dans le langage vernaculaire de la philosophie, en quête d'une cohérence logique autant que d'une vision holiste, visant la totalité. Au contraire, Rabelais est dans la narration pure, le magique et le mystique, l'auto-exégèse de sa propre construction. À l'âge classique, Leibniz invente les univers multiples au sens de compossibles latents. Ils sont « en puissance » mais pas effectifs. Et, à l'époque contemporaine, David Lewis et Nelson Goodman les réintroduisent, pour des raisons liées à des questions techniques de linguistique, pour le premier, et à des problèmes tout à la fois logiques et métaphysiques pour le second. Jusqu'à mon ami Jean-Clet Martin, proche de Deleuze et auteur du meilleur blog de philosophie sur la toile³⁴, qui a récemment forgé – en écho à William James – le concept de plurivers.

Je crois que d'autres mondes, peut-être plus extraordinaires encore quoique trop souvent ignorés, se déploient également parmi nous, *hic et nunc*. Il suffit de s'accroupir dans une prairie pour entrevoir une sidérante planète des insectes ou de s'immobiliser dans une forêt pour percevoir les drapés diaprés d'un univers végétal. Un microscope est parfois plus efficace qu'un télescope. Pour qui sait retrouver son regard d'enfant, l'organisation d'une fourmilière est infiniment plus impressionnante, déroutante et émouvante que n'importe quelle société extraterrestre imaginée pour les besoins d'un film de science-fiction. Encore faudrait-il réinventer tout notre rapport aux animaux (aux animots comme l'écrivait Derrida). Aux vivants non-humains que nous avons réifiés au point d'en oublier leur statut d'êtres. La violence inouïe, proprement hallucinante si nous osons la contempler en face, avec laquelle nous traitons les bêtes – comme les appelle avec cette intelligence complice et raffinée Elisabeth de Fontenay dans son ouvrage majeur³⁵ – m'attriste infiniment. Elle me peine surtout, bien sûr, par l'immense souffrance qu'elle génère mais aussi par « l'interdit » que représente sa simple évocation. Comme si l'empathie avec la misère animale était synonyme de désintérêt pour la douleur humaine ! Comme si la simple référence à la tragédie endurée par les animaux était un affront au bon goût tant que perdurent les maux humains... La bêtise de ces réactions me stupéfait. De même, d'ailleurs, que le sempiternel et tout à fait insensé reproche « anthropomorphique ». Comment aborder l'autre sans, précisément, se mettre à sa place ? Étrange inconfort – entrelac, sans doute, de honte et de mépris – dans notre rapport aux animaux. Un grand

éthologue rapportait récemment que si tous les professionnels de l'étude du comportement savaient parfaitement que les bêtes souffrent lorsqu'elles sont placées en situation de stress, il y avait une sorte d'accord tacite pour ne pas l'évoquer dans les milieux universitaires. C'est vrai, c'est su, c'est évident, mais ça ne fait pas sérieux. Les grandes personnes ne parlent pas de ces choses-là... Combien de fois a-t-on entendu des intellectuels de haut niveau, par ailleurs brillants, s'ulcérer à l'idée d'une possible continuité entre l'homme et l'animal ? Continuité qui pourtant est non seulement aujourd'hui établie mais qui est aussi, je trouve, infiniment rassurante. Pour le dire simplement : l'homme est un animal.

Il serait peut-être temps de prendre nos responsabilités. Nos actes ont des conséquences. Souhaitons-nous acheter des chaussures fabriquées à l'autre bout du monde par des enfants-esclaves ? Heureusement pas. Veut-on continuer à consommer de la viande dans les conditions actuelles où les abattoirs fonctionnent suivant les pires schèmes de rationalisation brutale de la mise à mort ? Rien qu'aux États-Unis, environ 70 000 animaux sont tués chaque... minute ! Pour une consommation carnée excessive dont on sait, de plus, et sans le moindre de doute, qu'elle est très nuisible à la santé humaine. Peut-on réellement penser sans frémir aux 35 milliards d'animaux tués, chaque année, pour un seul pays, dans des conditions abominables ? À ces vivants qui n'ont jamais vécu. À ces êtres de pure souffrance. À ces porcs emprisonnés dans des cages serrant leurs corps au plus près afin d'empêcher le moindre mouvement – pas même celui d'une patte – pour accélérer leur prise de poids. Sans même mentionner les 13 500 litres d'eau qu'il faut, en moyenne, pour produire un seul kilogramme de viande de bœuf et donc à l'impact écologique majeur qui est associé à cette alimentation inadaptée. Il ne s'agit pas d'appeler à la sensiblerie. Je connais trop bien ce reproche un peu hautain et dédaigneux, souvent même suspicieux, fait à ceux qui voient les douleurs silencieuses des animaux, comme si cette capacité d'empathie avait quelque chose d'inquiétant. Il s'agit d'inviter à prendre ses responsabilités : estime-t-on, oui ou non, que le plaisir – si plaisir il y a – de sentir dans nos assiettes ce goût omniprésent de viande, mérite les supplices infligés ? La question est très simple. À chacun d'y répondre en connaissance de cause : nos actes ont un sens. Outre cette dimension éthique, et surtout bien au-delà du simple problème de l'alimentation, j'espère que nous (re)découvrirons les mondes animaux – comme les nommait le génial Von Uexküll³⁶, inspirant Deleuze et Merleau-Ponty – pour nous extraire enfin de l'invention de l'animal-objectal, dédié aux tests des cosmétiques, à la suralimentation des pays riches, aux loisirs sadiques des enfants tortionnaires ou des aficionados de corrida et, finalement, à tous les plaisirs décomplexés

des seuls humains. Voilà, je crois, le premier univers parallèle à arpenter : celui des vivants oubliés. Avec délicatesse. Les biologistes et comportementalistes savent maintenant que les animaux sont infiniment plus proches des hommes, dans leurs anatomies comme dans leurs sentiments, que nous l'avons cru (ou avons feint de le croire) pendant des siècles. Mais cet argument ne devrait pas même intervenir : l'autre n'est-il pas respectable, justement, dans son altérité ? Faut-il nécessairement qu'ils nous ressemblent pour que nous les aimions, enfin, un peu ? Les vieilles rengaines ineptes « les animaux n'ont pas d'histoires », « ils n'ont pas de rapports sociaux », « ils n'ont pas de conscience », scientifiquement fausses et philosophiquement faibles, ont assez servi à légitimer les pires attitudes humaines³⁷. Comme la simple observation aurait dû permettre de le savoir depuis longtemps, la recherche a maintenant prouvé l'existence, par exemple, d'une authentique capacité de conceptualisation chez certains insectes ou celle du substrat neurologique de la conscience chez de nombreuses espèces. Les animaux peuvent-ils continuer à être, dans le Code civil, considérés comme des « biens meubles » (au même titre qu'une chaise ou une armoire) ? À être les objets (plus que les sujets) d'infinies souffrances silencieuses ? Milan Kundera, évoquant dans *L'insoutenable légèreté de l'être* notre comportement envers les animaux, exprime magnifiquement la situation : « et c'est ici que s'est produite la faillite fondamentale de l'homme, si fondamentale que toutes les autres en découlent... »



Comme l'a montré Von Uexküll, le monde de la tique est tout aussi riche, légitime et diapré que celui d'un autre vivant. Il fonctionne simplement selon des règles qui ne sont pas les nôtres.

Tique sur sa branche

Meta-diversité

La théorie des cordes conduit donc à une quantité extraordinairement élevée de lois différentes possibles. Ces lois proviennent des manières d'enrouler les dimensions supplémentaires et, pour des raisons techniques, des flux magnétiques généralisés qui les traversent. Un résultat qui devient vertigineux lorsqu'il est pensé en parallèle de l'inflation cosmologique. Quand on la regarde de près, il semble que celle-ci crée non pas un univers mais une arborescence – peut-être une infinité – d'univers-bulles. La raison pour cela est simple. Pendant l'inflation, l'espace croît exponentiellement. Les zones qui sortent de l'inflation et deviennent un univers comme le nôtre, sont donc toujours exponentiellement moins nombreuses que celles qui

continuent à enfler. En ce sens, il s'agit donc d'une inflation éternelle. Voilà la véritable méta-strate de diversité : l'inflation crée des mondes disjoints les uns des autres et la théorie des cordes – si elle est correcte – les structure avec des lois physiques différentes.

Suivant cette image, les autres univers ne se contentent pas de présenter des phénomènes différents de ceux qui nous sont accessibles mais ils sont également régis par d'autres lois physiques ! Tout ou presque devient alors possible : des mondes où la gravitation est répulsive, des mondes à 10 dimensions, des mondes de lumière, des mondes de matière. C'est ici qu'intervient, pour tenter d'appréhender l'architecture globale du multivers, le principe anthropique. Contrairement à ce qui est parfois supposé, celui-ci ne constitue en rien un retour à l'anthropocentrisme pré-copernicien ou une explication théologique : tout au contraire, il invite seulement à tenir compte de ce que nous ne pouvons pas nous trouver n'importe où dans ce multivers. C'est un principe de précaution. De la même manière que notre planète, la Terre, est évidemment un environnement hospitalier qui n'est pas représentatif de l'ensemble de notre Univers, notre Univers est certainement régi par des lois favorables à l'apparition de la vie qui ne sont sans doute pas représentatives de l'ensemble du multivers. C'est un principe d'humilité. À la question importante « pourquoi les lois de la physique semblent-elles si miraculeusement adaptées à l'existence de la complexité ? » la réponse devient alors : parce qu'ailleurs les lois sont autres et, en tant que structures complexes, nous nous trouvons nécessairement dans une zone du multivers qui autorise une telle complexité. Autrement dit : si on ne joue qu'une fois au loto, on a peu de chance de tirer la combinaison gagnante (celle conduisant, par exemple, à la possibilité d'une biologie et d'une chimie élaborées), mais si on joue une infinité de fois, il y a nécessairement des moments où celle-ci doit sortir. C'est un déplacement fondamental dans la manière de penser la physique.

Loin d'une explication téléologique, c'est-à-dire finaliste, ce multivers constituerait plutôt donc une nouvelle blessure narcissique. Après celles infligées par Darwin, Copernic et Freud³⁸, la cosmologie moderne ferait choir notre Univers lui-même de son piédestal. Beaucoup de physiciens sont mal à l'aise face à cette proposition qui demeure, évidemment, très spéculative. Le désamour vient essentiellement de l'inadéquation supposée entre cette vision et la définition de la science. Nous adonnons-nous encore ici à de la physique ? Mon objection à cette réserve est double. D'abord, je crois que la physique est ce que nous en faisons. Si, aujourd'hui, les praticiens de la science venaient à ressentir le besoin de brouiller les linéaments de leur propre champ disciplinaire, qui devrait les en dissuader ? La musique de Schoenberg n'est plus celle de Haendel, la

peinture de Kandinsky n'est plus celle de Vermeer. Elles ne satisferaient pas même aux définitions qu'un esthéticien de la Renaissance (esthétique qui, *stricto sensu*, n'existait pas puisqu'on la doit au philosophe allemand du XVIII^e siècle Alexander Baumgarten³⁹) aurait pu donner de l'art. Toutes les *praxis*, les activités codifiées, se transforment de l'intérieur. Pourquoi la science, seule, devrait-elle échapper à cette saine nécessité évolutive ? Alors même qu'elle est par définition une pensée dynamique du doute et de la remise en cause. Ensuite, je pense que le multivers ne requiert finalement pas une évolution si radicale quant à la nature de la démarche. Contrairement aux apparences, il demeure une proposition testable parce qu'il n'est pas une théorie inventée de façon arbitraire pour satisfaire notre soif de diversité mais une conséquence de théories. Si la théorie des cordes ou le scénario inflationnaire venait à être infirmés par des expériences locales, il est évident que toutes les prédictions associées, y compris le multivers, s'évanouiraient en même temps. Nous ne disposons que d'un unique échantillon, notre Univers, mais il permet déjà de tester le modèle à un certain niveau de confiance. Nous n'avançons pas en aveugle. Il est possible de faire des prédictions dans le multivers et de les confronter aux observations. Le modèle sous-jacent est testable. Si celui-ci venait à être suffisamment bien corroboré par diverses expériences, il y aurait quelque chose de l'obstination – peut-être même de l'acharnement – à lui dénier la conséquence « univers multiples » alors même qu'elle s'y dessine naturellement et permet de résoudre d'épineuses questions de physique théorique.

Apprendre à penser correctement dans le multivers ne se fera pas du jour au lendemain. Il faudra inventer de nouvelles manières de construire une représentation scientifique du réel. Mais se joue ici quelque chose de première importance. Plutôt qu'une mythologie, c'est une véritable logo-mythie qui se dessine : *logos*, la raison, devient première, mais elle semble mener, inéluctablement peut-être, à *muthos*, à ces mondes invisibles et donc nécessairement mythiques. Retour, en un sens, de ce que le philosophe Bruno Pinchard nommait dans l'une de nos conversations « la Bouche d'ombre ». Non pas l'obscurantisme, mais l'obscurité. Nyx plutôt qu'Erèbe, la grâce de la nuit plutôt que l'enfer des ténèbres.

La théorie des boucles conduit, elle aussi, à une forme de multivers. Il n'est pas ici spatial ou parallèle, il est temporel. Les mondes se succèdent les uns aux autres. Gardant, éventuellement, une furtive mémoire du cycle précédent. Un Univers en rebond qui se contracte puis se dilate. Une seule fois ou une infinité de fois, suivant la valeur des paramètres du modèle. Cette nouvelle cosmologie est bien évidemment dangereuse. Incertaine. Spéculative. Comme toute pensée innovante. Mais c'est un risque qui, je crois, mérite d'être couru.

Je ne sais pas exactement ce que fut l'origine de notre Univers et ce que sera l'avenir de nos recherches. Personne ne peut sans doute prétendre le savoir avec certitude. Mais ce chemin vaut la peine d'être parcouru. À moins qu'il ne faille plutôt choisir une balade, un peu erratique, à travers champ ou en forêt, sur le mode de ce que Derrida nommait une « destinerrance ». Quelque part où, toujours, le poète veille. Invente des espaces et lacère le réel. Quelque part où les fugues ne s'achèvent pas. Quelque part où la folie sublime et si parfaitement lucide d'Antonin Artaud peut encore nous écorcher et détraquer la mécanique de nos devenirs : « Nul n'a jamais écrit ou peint, sculpté, construit, inventé, que pour sortir en fait de l'enfer ». Ou y plonger, justement. Mais ça aussi, bien sûr, il le savait.

Notes et références bibliographiques

[1] M. Heidegger, *Introduction à la métaphysique*, (1935), Paris, Gallimard, 1967. Heidegger, philosophe allemand de la mouvance phénoménologique, y présente la métaphysique à partir des corrélatifs traditionnels de l'être : devenir, apparence, pensée, valeur. C'est une bonne approche de son œuvre, avant de plonger dans le livre majeur, et difficile, *Être et temps*.

[2] « Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? », écrivait Leibniz, philosophe et mathématicien allemand, en 1740 dans ses *Principes de la nature et de la grâce fondés en raison*. Leibniz est l'auteur d'un immense système philosophique d'une sidérante cohérence et complétude.

[3] L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, (1922), Paris, Gallimard, 1993. Dans ce petit livre d'une importance considérable, Wittgenstein, l'un des philosophes majeurs du XX^e siècle, s'intéresse, dans un langage très formel, à la théorie de la connaissance, aux principes de la physique, à l'éthique et à la mystique.

[4] Platon, *Théétète*. Dans ce dialogue essentiel, Platon pose principalement, *via* la mise en scène de Socrate, la question de la définition de la science.

[5] Le concept de ligne de fuite, ces voies dangereuses qui mènent à des lieux radicalement autres, a été élaboré par Félix Gattari et Gilles Deleuze. Il peut être opportun de découvrir leur pensée au travers de leur dernier ouvrage commun : G. Deleuze et F. Gattari, *Qu'est-ce que la philosophie ?*, Paris, Éditions de Minuit, 1991. L'œuvre la plus aboutie à mon sens, véritable livre-monde, est *Mille Plateaux*, Paris, Éditions de Minuit, 1980. Deleuze est un acteur important de la philosophie continentale de la deuxième moitié du XX^e siècle. Il a créé de nombreux concepts.

[6] E. Poe, *Eureka*, (1848), *Œuvres en prose*, Paris, Pléiade, 1951. Au-delà de cette anecdote, Poe est une figure essentielle du romantisme américain qui a inspiré de nombreux autres écrivains ainsi que de nombreux philosophes.

[7] E. Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, (1755), Paris, Vrin, 1984. Si l'histoire retient avant tout de Kant ses trois critiques magistrales (de la raison pratique, de la raison pure et de la faculté de juger), il a également marqué la philosophie moderne par

plusieurs ouvrages « annexes » et non moins originaux.

[8] Descartes, philosophe français majeur du XVII^e siècle, a érigé le doute en véritable méthode philosophique. Mêmes les vérités mathématiques y sont soumises.

[9] Le concept est utilisé ici au sens de Kuhn, philosophe américain du XX^e siècle, c'est-à-dire comme désignant un ensemble de pratiques scientifiques qui constituent une représentation générale du monde. Kuhn a d'ailleurs suggéré de le remplacer par « matrice disciplinaire ».

[10] On pourra, par exemple, se référer à B. Latour, *La science en action*, Paris, La Découverte, 1999.

[11] Tout à la fois comme introduction générale à la pensée de Michel Foucault, éminent philosophe du courant *postmoderne*, et à la place de ces concepts particuliers dans son œuvre, on pourra consulter P. Veyne, *Foucault, sa pensée, sa personne*, Paris, Livre de Poche, 2010.

[12] Dans son magnifique poème *Ainsi parlait Zarathoustra* (1883), Nietzsche présente l'enfant comme la dernière métamorphose de l'esprit, après le chameau et le lion. Ce très singulier philosophe et poète allemand du XIX^e siècle a défié les grands systèmes de pensée élaborés avant lui.

[13] Lucrèce, poète latin du I^{er} siècle avant J.-C., y écrivait : « Le grand tout ne se termine dans aucune direction ; car autrement il aurait une extrémité. Mais un corps ne peut en avoir, je pense, si on voit au-delà quelque chose qui le limite, et qui empêche la vue de passer outre. Or, puisqu'il faut avouer que rien n'existe au-delà du monde, le monde n'a donc aucune extrémité, et par conséquent il n'a ni fin ni mesure. Peu importent les régions où tu es placé : quelque lieu que tu occupes, un espace sans bornes te restera ouvert en tous sens. En supposant même que le grand tout finisse, si un homme va se placer au bout du monde, comme le dernier point de ses dernières limites, et que de là il jette une flèche ailée ; lequel aimes-tu mieux, ou que le trait, lancé avec force, aille là où il a été envoyé, et vole au loin ; ou que je ne sais quoi l'arrête, et lui fasse obstacle ?

Car il faut choisir ; et, quelque parti que tu prennes, tu ne peux nous échapper, et tu es réduit à accorder au monde une étendue infinie. En effet, soit que la flèche, arrêtée par un obstacle, ne puisse achever sa course et atteindre le but, soit qu'elle passe outre, elle ne part pas de l'extrémité du monde. Je te poursuivrai ainsi ; et, dans quelque lieu que tu fixes des bornes, je te demanderai ce qui arrivera à la flèche. Il arrivera que, pour lui faire place, les bornes reculeront, et le monde se prolongera sans cesse. »

[14] Comme archétype de ce point de vue, on pourra lire R. Boudon, *Le relativisme*, Paris, Que Sais-je ?, PUF, 2008.

[15] Les postures philosophiques de ces auteurs sont extrêmement différentes les uns des autres. Je souhaite ici juste souligner qu'ils ont tous défendu une certaine forme de relativisme visant à fissurer les normes et dogmes de leurs époques respectives.

[16] Bien qu'il ait ensuite pris ses distances par rapport à cet ouvrage, le livre qui a fait connaître Paul Veyne du grand public, *Les grecs ont-ils cru à leurs mythes ?*, Paris, Seuil, 1983, conserve aujourd'hui encore une évidente fraîcheur dans la manière d'interroger le sens du mythe.

[17] Jean-Luc Nancy est un des philosophes français contemporains les plus traduits et étudiés dans le monde. Bien que cette classification n'ait pas grand sens, on peut le situer dans la mouvance « postmoderne », avec Derrida, Foucault et Lyotard. Son œuvre est considérable et protéiforme.

[18] La *Théogonie* a été écrite par Hésiode au VIII^e siècle av. J.-C. Immense poème, composé en hexamètre dactylique (rythme très particulier qui reproduit la saccade des phalanges), elle relate l'origine des dieux et des éléments, c'est-à-dire de l'Univers.

[19] Le *Timée* est un récit saisissant en ce qu'il est d'une part très classique par son architecture et, d'autre part, extraordinairement novateur par sa méthode, en particulier *via* le recours aux mathématiques.

[20] Dans *Conjecture et réfutation*, (1963) Popper écrit « Une théorie qui n'est réfutable par aucun événement qui se puisse concevoir est dépourvue de caractère scientifique ». Pour approfondir sa pensée, ayant joué un rôle important en épistémologie, on pourra lire K. Popper, *La connaissance objective*, (1972), Paris, Aubier, 1991. Une posture radicalement différente – et à mon sens plus correcte – sur la structure de la pensée scientifique pour être trouvée, par exemple, chez Paul Feyerabend.

[21] Deleuze définissait la philosophie comme « invention de concepts » et les concepts ici mentionnés sont explicités dans G. Deleuze et F. Gattari, *Qu'est-ce que la philosophie ?*, Paris, Éditions de Minuit, 1991. Une introduction courte, simple et érudite à la pensée de Deleuze peut être trouvée dans J.-C. Martin, *Deleuze*, Paris, L'Éclat, 2012.

[22] Kurt Gödel, mathématicien germano-américain du XX^e siècle, est connu pour son théorème d'incomplétude qui stipule que dans tout système logique complexe il existe des propositions qui ne peuvent être ni infirmées ni confirmées par les hypothèses (axiomes) de base. C'est une révolution mathématique.

[23] Les personnages de Dostoïevski condensent une extraordinaire ambivalence et un lien particulier avec le désespoir en un sens que je

rapprocherais de ce qu'on peut improprement appeler « l'âme russe ».

[24] Gilles Deleuze s'est beaucoup intéressé au concept de résistance. On en trouvera une illustration dans son célèbre abécédaire. Il a aussi pris position politiquement : « être de gauche c'est d'abord penser le monde, puis son pays, puis ses proches, puis soi ; être de droite c'est l'inverse », déclarait-il dans un entretien au *Nouvel Observateur*.

[25] Jacques Derrida est un des philosophes majeurs du XX^e siècle. Sa pensée ne se laisse pas capturer en quelques phrases et s'attarde toujours sur les détails jugés initialement – et à tort – insignifiants. Il a mis en évidences de nombreuses limites et faiblesses au sein de la tradition métaphysique. À mon avis, le livre le plus accessible pour le découvrir est *Positions*, Paris, Éditions de Minuit, 1972.

[26] Véronique Bergen a publié de nombreux ouvrages dans des domaines très différents. On pourra aborder son œuvre romanesque avec *Fleuve de cendres*, Paris, Denoël, 2008 et son œuvre philosophique avec *Résistances philosophiques*, Paris, PUF, 2009. Je ne saurais donner aucun conseil concernant ses poèmes, il faut s'y perdre.

[27] L'ouvrage auquel je réfère ici est N. Goodman, *Manière de faire des mondes*, (1978), Paris, Gallimard, 2006. Goodman est un philosophe américain du XX^e siècle, du courant « analytique » (qu'on oppose généralement au courant continental « phénoménologique »).

[28] Je réfère ici à P. Feyerabend, *La science en tant qu'art*, Paris, Albin Michel, 2003.

[29] L'œuvre d'Hélène Cixous, professeure, écrivaine, critique et féministe est large et souvent difficile. Je conseillerais peut-être de l'aborder avec *Hyperrêve*, Paris, Galilée, 2006.

[30] La *French Theory* (Théorie Française) est un terme anglo-saxon qui désigne un ensemble très hétérogène d'auteurs parmi lesquels on peut citer : Foucault, Derrida, Deleuze, Lacan, Kristyeva, Cixous, Lévi-Strauss, ou de Beauvoir.

[31] Pour une introduction simple à cette idée, on pourra lire C. Rovelli, *Et si le temps n'existait pas ?*, Paris, Dunod, 2011.

[32] Giordano Bruno, philosophe italien de la deuxième moitié du XVI^e siècle, a notamment montré la pertinence du concept d'univers infini. Son propos éminemment subversif lui a valu d'être brûlé vif.

[33] Écrivain et humaniste français du début du XVI^e siècle, François Rabelais est à l'origine d'une œuvre considérable convoquant des savoirs de natures extrêmement différentes et innervée tout autant de science que d'ésotérisme.

[34] <http://strassdelaphilosophie.blogspot.fr/>

[35] E. de Fontenay, *Le Silence des bêtes, la philosophie à l'épreuve de*

l'animalité, Paris, Fayard, 1998.

[36] Jakob von Uexküll a, en particulier, forgé le concept d'*Umwelt* suivant lequel chaque espèce animale vit dans son univers propre.

[37] On pourra par exemple se reporter au magnifique ouvrage d'Eric Baratay, *Le Point de vue animal, une autre vision de l'histoire*, Paris, Seuil, 2012.

[38] En psychanalyse, on parle de blessure narcissique pour évoquer Copernic montrant que la Terre n'est pas au centre de l'Univers, Darwin soulignant que l'homme est un animal parmi les autres et Freud découvrant que la conscience n'est pas toujours souveraine.

[39] Le néologisme « esthétique » apparaît dans la *Méditation philosophique touchant l'essence du poème* de Gottlieb Baumgarten, philosophe allemand élève de Leibniz, en 1735.

Remerciements

Outre les personnes citées dans ce livre, j'aimerais remercier très chaleureusement : Jean-Michel Alimi, Pierre Antilogus, Frenando Barao, Sylvain Baumont, Bérengère Birée, Michel Buénerd, Michel Cassé, Louise Chambon, Joel Chauvin, Johann Collot, Lena Da Ros, Laurent Derome, Elie During, Berrie Giebels, Alexia Gorecki, Pierre Kervella, Serge Kox, Lise Landrin, Sabrina Loriod, David Maurin, Thierry Menissier, Lucile Mignon, Chloé Muteau-Jaouen, David Polarski, Vivian Poulin, Konstantin Protassov, Jean-Stéphane Ricol, Monique Rivoal, Laurent Sacco, Alexis de Saint-Ours, Richard Taillet, Charling Tao, Christophe Vescovi, Francesca Vidotto, Laure Vincent, Jennifer Vingtans, Pernelle Vodinh.

Crédits

- p. 10 : © Nasa
- p. 11 : © ESA and the Planck Collaboration
- p. 20 © Nasa, ESA, J. Hester et A. Loll, université de l'État d'Arizona
- p. 28 : © Nasa
- p. 39 : d'après Nasa/WMAP Science Team
- p. 78 : d'après Daniel Bonnerue, « Tableau des particules élémentaires dans le cadre du modèle standard » (2005)
- p. 84 : © Cern
- p. 95 : © avec l'aimable autorisation de V. Springel, université d'Heidelberg/HITS, Allemagne
- p. 109 : d'après Bruno Bourgeois
- p. 126 : © Guillaume Aubin
- Quatrième de couverture : © Ulysse Barrau

Index

accélérateur de particules, 224, 498
AMS, 113, 120
Anaximandre, 659
antimatière, 11, 225, 399, 542
art, 181, 234, 312, 454, 628, 639, 692, 728
Artaud A., 244, 462, 697
Ashtekar A., 564, 590
astronomie, 54, 89
astrophysique, 30, 52, 64, 88, 101, 106, 135, 139, 145, 165, 185, 314, 345, 456, 512, 587
avant le Big Bang, 16, 577
Bach, 17, 217, 236
Bataille, 245, 463
Baumgarten, 691
Bergen V., 383, 631, 726
Big Bang, 29, 34, 39, 74, 131, 134, 137, 150, 152, 156, 161, 163, 169, 177-180, 183, 190, 192, 391, 398, 459, 476, 516, 536, 543, 581, 593
Big Bounce, 583, 595
Bogoliubov, 380
Bojowald M., 579
boson de Higgs, 443, 486
bosons de jauge, 418
brisure de symétrie, 446
brisure spontanée de symétrie, 438

carbone [14](#), [154](#)
cascades de particules, [84](#)
CERN, [439](#), [445](#), [453](#)
champ de Higgs, [437](#)
champ gravitationnel, [251](#)
champs, [21](#), [61](#), [118](#), [258](#), [522](#), [556](#), [570](#)
Cioran, [4](#)
Cixous H., [644](#), [729](#), [734](#)
CNRS, [455](#)
COBE, [32](#), [36](#), [38](#), [68](#), [96](#), [170](#), [171](#)
conditions initiales, [26](#)
constante cosmologique, [510](#), [533](#)
constructivisme, [289](#), [637](#)
contraction des longueurs, [214](#), [215](#)
coordonnées, [196](#), [199](#), [203](#)
Copernic, [685](#)
cosmologie quantique à boucles, [586](#)
courbure, [270](#), [332](#), [547](#)
Crépon M., [634](#)
Darwin, [48](#), [239](#), [684](#), [738](#)
de Fontenay E., [673](#), [737](#)
décalage vers le rouge, [149](#)
déconstruction, [37](#), [230](#), [297](#), [630](#), [638](#), [647](#)
Deleuze G., [24](#), [42](#), [309](#), [458](#), [624](#), [670](#), [675](#), [702](#), [721](#), [724](#), [733](#)
Démocrite, [660](#)
Derrida J., [2](#), [280](#), [535](#), [623](#), [632](#), [645](#), [650](#), [672](#), [696](#), [716](#), [725](#), [732](#)
Descartes, [182](#)
déterritorialisation, [310](#)
difféomorphismes, [371](#)
dilatation du temps, [207](#), [213](#)
dimensions supplémentaires, [607](#)
Dirac P., [226](#)
Dollfus A., [513](#)
 $E = mc^2$, [221](#)
École normale supérieure, [635](#)
Einstein, [40](#), [235](#), [248](#), [256](#), [265](#), [269](#), [273](#), [294](#), [324](#), [335](#), [353](#), [366](#),

373, 388, 502, 509, 551, 561, 571, 582, 596
énergie noire, 482, 500, 506, 519, 528, 541
entropie, 360, 574, 612
Épicure, 661
espace-temps, 219, 257, 325, 328, 333, 337, 349, 370, 382, 385, 548, 568, 654
étoile à neutron, 81
étoiles à neutrons, 76
Everett, 657
expansion, 10, 15, 141, 147, 151, 174, 184, 194, 267, 386, 466, 501, 544, 584
Feynman R., 227
force électromagnétique, 420, 432
force gravitationnelle, 253, 424
force nucléaire faible, 423, 433
force nucléaire forte, 421, 488
Foucault M., 188, 282, 291, 464, 707, 717, 731
French Theory, 646
Freud, 686
galaxie, 47, 62, 117, 143, 158, 264, 527
galaxies, 9, 13, 71, 103, 133, 138, 142, 159, 268, 315, 343, 471, 480, 483, 523, 525, 532
Galilée, 250, 730
Gibbons, 242
Giordano Bruno, 664
gluons, 422
Gödel K., 354, 722
Goodman N., 636, 668, 727
grandes écoles, 240
gravitation quantique à boucles, 7, 449, 553, 555, 560, 567, 578, 588, 592, 600, 605, 614, 619, 642
gravitons, 425, 603
Guattari F., 43, 300
Haendel, 688
Hawking S., 598
Heidegger M., 18, 191, 698
Héraclite, 620

Hésiode, [303](#), [718](#)
Holye F., [153](#)
horizon, [97](#), [318](#), [321](#), [326](#), [334](#), [356](#), [526](#), [575](#)
Hubble, [144](#)
inflation, [8](#), [378](#), [594](#), [678](#)
infrarouges, [70](#), [94](#), [99](#), [127](#)
Institut des Hautes Études scientifiques, [350](#), [617](#)
Institut for Advanced Study, [616](#)
Institut Perimeter, [450](#)
Institut universitaire de France, [457](#)
Institute for Advanced Study, [351](#)
invariance de fond, [369](#), [562](#)
James W., [285](#), [671](#)
Jankélévitch V., [539](#)
Kandinsky, [238](#), [689](#)
Kant, [626](#), [704](#)
Kant E., [140](#)
Keck, [521](#)
l'Université d'État de Moscou, [372](#)
Lagrangien, [367](#)
Latour B., [187](#), [293](#), [706](#)
Leibniz, [19](#), [627](#), [666](#), [699](#), [739](#)
Lemaître G., [146](#)
lentilles gravitationnelles, [478](#)
Lewis D., [667](#)
LHC, [444](#), [452](#), [487](#)
lignes de fuite, [23](#)
loi de l'inertie, [198](#)
LSST, [524](#)
Lucrèce, [272](#), [662](#), [710](#)
lumière, [12](#), [33](#), [45](#), [49](#), [55](#), [58](#), [77](#), [85](#), [86](#), [107](#), [148](#), [157](#), [168](#), [208](#),
[320](#), [336](#), [339](#), [358](#), [389](#), [400](#), [468](#), [475](#), [504](#), [629](#), [652](#), [680](#)
Luminet J.-P., [655](#)
Maldacena J., [615](#)
Martin J.-C., [669](#)
masse et énergie, [222](#)

mathématique, [193](#), [200](#), [237](#), [249](#), [255](#), [322](#), [368](#), [414](#), [428](#), [491](#),
[589](#), [618](#), [723](#)

mathématiques, [204](#), [229](#), [231](#), [233](#), [346](#), [352](#), [374](#), [495](#), [545](#), [705](#),
[719](#)

matière noire, [469](#), [474](#), [477](#), [481](#), [497](#), [505](#), [517](#), [540](#)

mécanique quantique, [406](#), [511](#), [552](#), [559](#), [563](#), [572](#), [656](#)

Merleau-Ponty, [676](#)

météorites, [155](#)

métrique, [597](#)

micro-ondes, [66](#)

modèle électrofaible, [490](#)

modèle standard, [379](#), [397](#), [405](#), [492](#)

Montaigne, [283](#)

mousse de spins, [569](#)

multivers, [649](#), [651](#), [681](#), [683](#), [694](#), [695](#)

mythe, [302](#), [714](#)

Nancy J.-L., [132](#), [292](#), [534](#), [625](#), [715](#)

nébuleuse du Crabe, [80](#), [82](#)

neutrinos, [104](#), [112](#), [121](#), [129](#)

Newton, [25](#), [202](#), [252](#), [260](#), [263](#), [306](#), [365](#), [408](#)

Nicolas de Cues, [663](#)

Nietzsche, [3](#), [281](#), [296](#), [461](#), [622](#), [709](#)

nihilisme, [278](#), [298](#)

nucléosynthèse primordiale, [162](#)

observatoire, [515](#)

ondes gravitationnelles, [123](#), [130](#)

ondes radio, [53](#), [57](#), [125](#)

ontologie, [640](#)

Orphée, [658](#)

oscillations acoustiques de baryons, [529](#)

paradoxe de Olbers, [136](#)

particules, [5](#), [28](#), [60](#), [92](#), [105](#), [111](#), [122](#), [210](#), [223](#), [259](#), [347](#), [381](#), [393](#),
[396](#), [404](#), [407](#), [409](#), [419](#), [441](#), [442](#), [484](#), [609](#)

paysage de lois, [608](#)

Perimeter Institute, [576](#)

physique des particules, [31](#), [102](#), [110](#), [164](#), [376](#), [392](#), [394](#), [403](#), [413](#),
[416](#), [427](#), [431](#), [436](#), [451](#), [467](#), [470](#), [485](#), [499](#), [602](#)

Pic du Midi, [514](#)
plan d'immanence, [311](#)
Planck, [95](#), [175](#), [473](#)
Platon, [22](#), [124](#), [262](#), [304](#), [701](#)
Poe E., [703](#)
Popper K., [305](#), [720](#)
principe anthropique, [682](#)
principe d'équivalence, [254](#)
principe de jauge, [426](#)
Protagoras, [279](#)
quarks, [402](#), [415](#)
quasar, [63](#), [90](#), [100](#), [109](#), [344](#)
quintessence, [507](#)
Rabelais, [665](#), [736](#)
radiogalaxies, [160](#)
rayonnement fossile, [35](#), [67](#), [166](#), [167](#), [176](#), [472](#), [531](#), [591](#)
rayons cosmiques, [115](#), [119](#), [212](#)
rayons gamma, [46](#), [78](#), [83](#), [87](#), [93](#), [98](#), [126](#), [342](#)
rayons X, [75](#)
référentiel galiléen, [197](#)
relativisme, [274](#), [275](#), [277](#), [288](#), [295](#), [711](#), [712](#)
relativité générale, [41](#), [246](#), [261](#), [266](#), [271](#), [276](#), [307](#), [323](#), [362](#), [364](#),
[384](#), [465](#), [479](#), [508](#), [550](#), [565](#), [653](#)
relativité restreinte, [195](#), [216](#), [218](#), [220](#), [228](#), [247](#), [412](#)
Rorty, [284](#)
Rovelli C., [558](#), [566](#), [648](#), [735](#)
Schoenberg, [687](#)
singularité, [357](#), [546](#), [580](#)
Smolin L., [448](#)
Sokal A., [633](#)
Soleil, [27](#), [50](#), [56](#), [73](#), [79](#), [108](#), [317](#), [331](#), [518](#)
Soulages, [243](#)
Spinoza, [621](#)
Starobinsky A., [377](#)
Station spatiale internationale, [114](#)
SU(5), [489](#)

supernovae, [503](#)
supersymétrie, [494](#), [496](#)
symétrie, [411](#), [434](#), [435](#), [440](#), [447](#), [493](#)
symétries, [201](#), [401](#), [410](#), [417](#), [429](#), [430](#)
synchrotron, [59](#)
théorie des cordes, [6](#), [537](#), [554](#), [599](#), [601](#), [604](#), [606](#), [610](#), [611](#), [641](#),
[677](#), [693](#)
thermodynamique, [361](#)
transformations de Lorentz, [205](#), [206](#)
trou noir, [14](#), [65](#), [91](#), [299](#), [301](#), [313](#), [319](#), [327](#), [329](#), [330](#), [338](#), [340](#),
[341](#), [348](#), [355](#), [359](#), [363](#), [375](#), [387](#), [549](#), [557](#), [573](#), [613](#)
ultraviolets, [72](#), [128](#)
Univers cyclique, [585](#)
Univers primordial, [173](#), [390](#), [395](#), [530](#)
univers-bulles, [679](#)
Universités, [241](#)
vérité, [1](#), [186](#), [189](#), [232](#), [287](#), [308](#), [460](#), [538](#), [643](#)
Vermeer, [690](#)
Veyne P., [290](#), [708](#), [713](#)
visages de l'Univers, [44](#), [51](#), [69](#)
VLT, [520](#)
Voie Lactée, [116](#), [316](#)
Von Uexküll, [674](#)
voyages dans le futur, [209](#), [211](#)
Wittgenstein, [20](#), [286](#), [700](#)
WMAP, [172](#)

Dans la même collection

Et si le temps n'existait pas ?
Un peu de science subversive
par Carlo Rovelli, 2012



E=mc² ?
Comment ça marche ?
Cox et Jeff Forshaw, 2012



Le livre des univers
par John Barrow, 2012

